



TU Clausthal

Konzeptionelle und experimentelle Untersuchungen zur Effizienzsteigerung von Oberflächenfiltern

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

vorgelegt von
Michael Rutz

aus Mühlhausen/Thüringen

genehmigt von der
Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung

03.12.2018

Dekan

Prof. Dr. rer. nat. habil. Bernd Lehmann

Vorsitzender der Promotionskommission

Prof. Dr.-Ing Norbert Meyer

Erstgutachter

Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann

weitere Gutachter

Prof. Dr. rer. nat. Alfred Weber

Prof. Dr.-Ing. Folker Flüggen

Für alle geliebten und geschätzten Menschen, mit denen ich mich umgeben darf und für den gleichen Schlag Menschen, der leider nicht mehr unter uns weilt.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Ergebnis der Kooperation zwischen der Technischen Universität Clausthal und der Hochschule Nordhausen. Im Zeitraum September 2011 bis Dezember 2016 war ich dazu als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich Ingenieurwissenschaften der Hochschule Nordhausen tätig.

Für die Möglichkeit zur Anfertigung dieser Arbeit sowie für die exzellente wissenschaftliche sowie organisatorische Betreuung bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann von Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik. Herrn Prof. Dr. rer. nat. Alfred Weber vom Institut für Mechanische Verfahrenstechnik gilt ebenfalls mein besonderer Dank für die Übernahme der Zweitbetreuung sowie die hervorragende Betreuung. Seitens der Hochschule Nordhausen danke ich herzlich Herrn Prof. Dr.-Ing. Folker Flüggen für die intensive und äußerst konstruktive Zusammenarbeit. Bei Frau Prof. Dr.-Ing. Sylvia Dannewitz möchte ich mich für die Initiative bedanken, durch die diese Arbeit erst ermöglicht wurde. Weiterhin gilt mein Dank meinen ehemaligen Kollegen sowie den zahlreichen Bacheloranden und studentischen Hilfskräften, die mich auf diesem Weg begleiteten.

Bei Herrn Dirk Barnstedt sowie seinen Mitarbeitern von der Schulz & Berger Luft- und Verfahrenstechnik GmbH bedanke ich mich für die Anregung dieser wissenschaftlichen Arbeit. Insbesondere betrifft dies die gewährte zeitliche und finanzielle Unterstützung auch außerhalb laufender Kooperationsprojekte.

Für die liebevolle Begleitung meines Lebensweges danke ich meinen Eltern Günter und Elisabeth Rutz. Immer ein offenes Ohr für meine Probleme wurden früh die Weichen für meine Zukunft gestellt. Abschließend bin ich meiner nunmehr eigenen Familie zutiefst zu Dank verpflichtet. Meine liebe Frau Bettina, mein Sonnenschein Hanna und selbst unser jüngster Spross Hubertus erlebten alle Hochs und Tiefs mit, zeigten viel Verständnis und gaben mir stets Kraft, wodurch ich ihnen unendlich und ewig dankbar bin.

Schlotheim im Dezember 2018

Zusammenfassung

Der Betrieb von Oberflächenfiltern wird stark durch rechtliche Rahmenbedingungen mit fortlaufend abgesenkten Emissionsgrenzwerten beeinflusst. Verbunden mit der wachsenden Bedeutung der Energieeffizienz stellt die Errichtung effizienter Oberflächenfilter eine erhebliche Herausforderung dar, die zukünftig nicht mehr allein auf Grundlage von Erfahrungswerten erfolgen kann. Mit der vorliegenden Arbeit wird deshalb ein Beitrag zur systematischen Effizienzsteigerung von Oberflächenfiltern betreffs Reduzierung der Staubemissionen sowie des spezifischen Energiebedarfs geleistet.

Als maßgeblicher Einflussparameter auf die Effizienz von Oberflächenfiltrationsprozessen wurden zirkulierende Staubanteile identifiziert. Der Erkenntnisstand zu diesem Effekt wurde im Ergebnis eigener konzeptioneller und experimenteller Untersuchungen entscheidend erweitert. Es wurde eine Methodik entwickelt, zirkulierende Staubanteile zu bilanzieren, wodurch sich Strategien zu deren Vermeidung nun objektiv beurteilen lassen. Das Verfahren lässt sich im Labor- und Technikumsmaßstab sowie anhand realer Oberflächenfilter anwenden.

Zur Errichtung effizienter Oberflächenfilter ist eine ganzheitliche Betrachtung der Lebenszykluskosten zwingend erforderlich. Daraus wird deutlich, dass der Einsatz hochwertiger und zunehmend intelligenter Komponenten sowie die gezielte Abstimmung von Konstruktion und Prozessführung trotz höherer Investitionskosten entscheidende ökonomische und ökologische Vorteile bieten. Methodische Ansätze zur Unterstützung der Anlagenauslegung werden dazu empfohlen. Durch Nutzung digitaler Produktkonfiguratoren können diese komplexen Zusammenhänge für den Anwender objektiv und anschaulich beurteilt werden.

Unter Berücksichtigung der neuen Erkenntnisse zu zirkulierenden Staubanteilen sowie mit Anwendung der Lebenszykluskosten wird das Potenzial des Rotationsentstaubers als neuartiger Typ Oberflächenfilter untersucht. Ein Benchmark mit einem konventionellen Oberflächenfilter liefert dazu eine objektive Datengrundlage. Es zeigt sich, dass der Rotationsentstauber aufgrund technischer Probleme mit der aufwendigen Konstruktion nicht marktfähig ist. Gegenüber einem Schlauchfilter wurden höhere Staubemissionen und Lebenszykluskosten ermittelt.

Das Potenzial smarter Oberflächenfilter wird im Spannungsfeld Industrie 4.0 mit einer modernen Instandhaltung aufgezeigt. Neben maximierter Verfügbarkeit und minimierten Betriebskosten eröffnet auch die Vernetzung von Oberflächenfiltern mit vor- und nachgeschalteten Prozessstufen neue Anwendungsfelder. Eine Handlungsempfehlung zur Weiterentwicklung von Oberflächenfiltern zu smarten, zukunftssicheren Filtern wurde erarbeitet, welche höchsten Ansprüchen an die Abscheide- und Energieeffizienz gerecht werden.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Symbolverzeichnis	VII
1 Einleitung und Motivation	1
2 Grundlagen	4
2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen	4
2.2 Abscheidemechanismen bei der Entstaubung	8
2.2.1 Transportmechanismen	10
2.2.2 Haftanteil	13
2.3 Aufbau von Oberflächenfiltern	14
2.4 Betrieb von Oberflächenfiltern	15
2.4.1 Rohgasanströmung	16
2.4.2 Druckverlustentwicklung und Aufbau des Staubkuchens	16
2.4.3 Filtermittelregenerierung und Emissionsverhalten	19
2.5 Abstimmung des Filtermittels auf die Anwendung	24
2.5.1 Granulometrische Eigenschaften	24
2.5.2 Einfluss des Agglomerationsverhaltens und dessen Beurteilung	25
2.5.3 Filtermittelauswahl.....	29
2.6 Bilanzierung von Entstaubungsprozessen	31
2.6.1 Volumenstrombilanzierung	32
2.6.2 Massestrombilanzierung	33
2.6.3 Energetische Bilanzierung	34
3 Charakterisierung und Bilanzierung zirkulierender Staubanteile.....	35
3.1 Stand der Technik	35
3.2 Einflussgrößen auf zirkulierende Staubanteile	38
3.3 Dynamik zirkulierender Staubanteile	41
3.4 Entwicklung einer Methodik zur Bilanzierung zirkulierender Staubanteile	43
3.4.1 Quantifizierung zirkulierender Staubanteile	43
3.4.2 Differenzierung zirkulierender Staubanteile	45
3.4.3 Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung von ZSA_A	46
3.4.4 Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung von ZSA_{ges}	49
3.4.5 Klassifizierung zirkulierender Staubanteile	51
3.5 Bilanzierung zirkulierender Staubanteile.....	52
3.5.1 Auswirkungen auf Stromverbrauch.....	53
3.5.2 Auswirkungen auf Staubemissionen und Druckluftverbrauch	57
3.6 Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen	58

4	Errichtung und Betrieb effizienter Oberflächenfilter	60
4.1	Ganzheitliche Betrachtung der Effizienz von Oberflächenfiltern	60
4.2	Absicherung der Anlagenauslegung	64
4.2.1	Nutzung empirisch gewonnener Erkenntnisse	65
4.2.2	Experimentelle Absicherung der Anlagenauslegung	69
4.2.3	Simulationsgetriebene Produktentwicklung	81
4.3	Auswahl effizienter Komponenten	83
4.3.1	Elektromotor	85
4.3.2	Filtermittel	85
4.4	Minimierung der Druckverluste	86
5	Potenzialbewertung des Rotationsentstaubers als neuartiger Oberflächenfilter	88
5.1	Idee des Rotationsentstaubers	88
5.2	Benchmarking bei der Oberflächenfiltration	91
5.2.1	Methodik	91
5.2.2	Konzeption und Realisierung des Versuchsaufbaus	92
5.2.3	Festlegung der Leistungsparameter	94
5.3	Prozessbeurteilung	95
5.3.1	Diskussion der Ergebnisse anhand der Leistungsparameter	95
5.3.2	Betrachtung der Lebenszykluskosten	97
6	Oberflächenfilter im Spannungsfeld Industrie 4.0	101
6.1	Begriffsklärung	101
6.2	Eigenschaften smarter Oberflächenfilter	104
6.2.1	Smart Maintenance	105
6.2.2	Big Data, Data Mining und Informationsaustausch	110
6.2.3	Risiken	114
6.3	Handlungsempfehlungen für zukunftssichere Oberflächenfilter	114
7	Fazit und Ausblick auf anstehende Herausforderungen	118
	Literaturverzeichnis	XI
	Anhänge	XIX
Anhang 1:	Messwerte Partikelgrößenverteilungen	XIX
Anhang 2a:	Datenblatt Calcit MX 20	XX
Anhang 2b:	Datenblatt Calcit MS 12	XXI
Anhang 2c:	Datenblatt Apyral 16	XXII
Anhang 2d:	Datenblatt Pural SB	XXIII
Anhang 3:	Versuchsanleitung zur Bestimmung zirkulierender Staubanteile	XXIV
Anhang 4:	Ausstattungsmerkmale Filterprüfstand	XXVI
Anhang 5a:	Datenblatt Nadelfilzfiltermedium	XXVII
Anhang 5b:	Datenblatt Membranfiltermedium	XXVIII
Anhang 6a:	Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung von ZSA_A	XXIX
Anhang 6b:	Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung von ZSA_{ges}	XXXI
Anhang 7:	Ausstattungsmerkmale Technikums-Schlauchfilter	XXXII

Anhang 8: Zusammensetzung der Druckverluste des Staubkuchens	XXXIII
Anhang 9: Checkliste zu zirkulierenden Staubanteilen	XXXIV
Anhang 10: Ausstattungsmerkmale Rotationsentstauber	XXXV
Anhang 11: Effektive Leistungsaufnahme des Schlauchfilters	XXXVI
Anhang 12a: Druckluftverbrauch Schlauchfilter	XXXVII
Anhang 12b: Druckluftverbrauch Rotationsentstauber.....	XXXVIII
Anhang 13: Auswertung Benchmark	XXXIX
Anhang 14: Berechnung Fraktionsabscheidegrad.....	XL
Anhang 15a: Lebenszykluskosten Rotationsentstauber.....	XLII
Anhang 15b: Lebenszykluskosten Schlauchfilter	XLIII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Emissionsgrenzwerte ausgewählter BImSchV	7
Tabelle 2: Methodische Ansätze zur Absicherung der Anlagenauslegung.....	65
Tabelle 3: Interpretation des Performance-Wertes	74
Tabelle 4: Auswahlmöglichkeiten energieeffizienter Komponenten eines Produktkonfigurators	84
Tabelle 5: Versuchseinstellungen Benchmark.....	93
Tabelle 6: Ergebnisse Benchmark	95
Tabelle 7: Konstruktive Auslegungskriterien Rotationsentstauber und Schlauchfilter	98
Tabelle 8: Vergleich der Nettoinvestitionskosten von Rotationsentstauber und Schlauchfilter	98
Tabelle 9: Lebenszykluskosten Rotationsentstauber – Schlauchfilter.....	99
Tabelle 10: Vor- und Nachteile unterschiedlicher Instandhaltungsstrategien	105
Tabelle 11: Empfehlung zum Data Mining smarterer Oberflächenfilter	111

Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Aspekte einer effizienten Oberflächenfiltration.....	2
Bild 2:	Entwicklung der Staubemissionen von Industrieprozessen in Deutschland	4
Bild 3:	Immissionsschutzrechtliche Vorgaben und Standards in der EU und Deutschland....	5
Bild 4:	Einzelfaserabscheidegrad als Funktion der Partikelgröße	9
Bild 5:	Transportmechanismen zur Abscheidung eines Partikels an einer Faser.....	10
Bild 6:	Aufbau Oberflächenfilter	15
Bild 7:	Differenzdruckverläufe eines Filtrationszyklus bei der Oberflächenfiltration	18
Bild 8:	Wirkende Kräfte zur Ablösung des Staubkuchens.....	20
Bild 9:	Erscheinungsformen unzureichender Staubkuchenabreinigung	21
Bild 10:	Differenzdruckverlauf Oberflächenfiltration	22
Bild 11:	Charakteristischer Verlauf der Staubemissionen eines Oberflächenfilters.....	23
Bild 12:	Partikelgrößenverteilungen ausgewählter Stäube	24
Bild 13:	Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen ausgewählter Stäube.....	26
Bild 14:	Elektronenmikroskopische Aufnahmen ausgewählter Filtermedien.....	30
Bild 15:	Bilanzierung der Oberflächenfiltration	32
Bild 16:	Differenzierung zirkulierender Staubanteile	36
Bild 17:	Modifizierter Filterprüfstand Bergische Universität Wuppertal.....	37
Bild 18:	Wesentliche Einflussgrößen auf zirkulierende Staubanteile.....	39
Bild 19:	Dynamik zirkulierender Staubanteile	42
Bild 20:	Durchführung von Untersuchungen zur Quantifizierung zirkulierender Staubanteile	44
Bild 21:	Versuchsanordnungen zur Differenzierung zirkulierender Staubanteile.....	45
Bild 22:	Labor-Filterprüfstand in Anlehnung an DIN ISO 11057	47
Bild 23:	Messung ZSA_A am Filterprüfstand bei variabler Anfiltration.....	48
Bild 24:	Technikums-Schlauchfilter	49
Bild 25:	Messung ZSA_{ges} an Technikums-Schlauchfilteranlage	50
Bild 26:	Klassifizierung zirkulierender Staubanteile	51
Bild 27:	Bilanzierung zirkulierender Staubanteile	53
Bild 28:	Wechselwirkungen zwischen regenerierten und benachbarten Filterelementen.....	54
Bild 29:	Zusammensetzung der Druckverluste des Staubkuchens	55
Bild 30:	Rückgang der auf primäres Rohgas zurückzuführenden Druckverluste in Abhängigkeit verschiedener Szenarien zirkulierender Staubanteile	56
Bild 31:	Energetische Folgen zirkulierender Staubanteile auf den Druckverlust des Staubkuchens	57
Bild 32:	Lebenszykluskosten konventionell und hochwertig errichteter Oberflächenfilter ..	61
Bild 33:	Benutzeroberfläche eines Produktkonfigurators für Oberflächenfilter am Beispiel der Ventilatorauswahl	64
Bild 34:	Dimensionierung der Filterfläche	65
Bild 35:	Konische Filterelemente mit reduzierter Aufströmgeschwindigkeit.....	67

Bild 36:	Vergleich unterschiedlicher Filterelementquerschnitte bei Patronenfiltern	68
Bild 37:	Versuchsaufbau zur Bilanzierung von Oberflächenfiltrationsprozessen	69
Bild 38:	Bürstendispergierer BEG 1000 Typ B	70
Bild 39:	Partikelgrößenverteilungen ausgewählter Rohgase	71
Bild 40:	Halbquantitativer Ansatz zur Berücksichtigung zirkulierender Staubanteile bei der Errichtung von Oberflächenfiltern	73
Bild 41:	Prinzip Rohgasstaubkonzentrationsmessung	75
Bild 42:	Messaufbau Reingasstaubkonzentrationsmessung	76
Bild 43:	Lichtstreuung an Partikeln	77
Bild 44:	Versuchsaufbau zur Messung der Partikelgrößenverteilung mit Aerosolspektrometer	80
Bild 45:	Stömungsdesign mit bevorzugter <i>top-down</i> -Strömung	82
Bild 46:	Entwicklung von Industriestrompreisen im Zeitraum 1998-2018	84
Bild 47:	Energieeffizienz im Fokus der Auslegung von Oberflächenfiltern	87
Bild 48:	Konzept Rotationsentstauber und Schlauchfilter	89
Bild 49:	Grundelement Rotationsentstauber	90
Bild 50:	Differenzdruckverlauf zwischen Roh- und Reingasseite im Vergleich Schlauchfilter und Rotationsentstauber	91
Bild 51:	Funktionsmodell Rotationsentstauber real und schematisch	93
Bild 52:	Filterspezifische Staubemissionen	96
Bild 53:	Filterspezifische Fraktionsabscheidegrade	97
Bild 54:	Verteilung Lebenszykluskosten Rotationsentstauber - Schlauchfilter	99
Bild 55:	Evolution von Fertigungsprozessen	102
Bild 56:	Anforderungen an smarte Oberflächenfilter	104
Bild 57:	Smart Maintenance bei Oberflächenfiltern	106
Bild 58:	Charakteristik einer restdruckverlustgesteuerten Filtermittelregenerierung	107
Bild 59:	Überprüfung Filtermitteldichtigkeit und -regenerierung	108
Bild 60:	Big Data und Data Mining bei smarten Oberflächenfiltern	110
Bild 61:	Roadmap Smart Oberflächenfilter	115
Bild 62:	Konzept BVT-Merkblatt „Oberflächenfilter“	120

Symbolverzeichnis

Lateinisch

Symbol	Dimension	Erläuterung
A_D	mm^2	Förderquerschnitt Bürstendispergierer
A_{eff}	m^2	Filterfläche, effektiv
AG	-	Auftreffgrad
B_1	m^2	Durchlässigkeit Filtermittel
B_2	m^2	Durchlässigkeit Staubkuchen
C_u	-	Cunningham-Korrektur
c_{rein}	mg/m^3	Reingasstaubkonzentration
c_{roh}	g/m^3	Rohgasstaubkonzentration
D	m^2 / s	Partikel-Diffusionskoeffizient
D_F	μm	Faserdurchmesser
D_p	μm	Partikeldurchmesser
D_R	m	Rohrdurchmesser
E	-	Gesamtabscheidegrad
F_e	N	elektrostatische Kraft
FFB	$\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})$	Filterflächenbelastung
H	-	Haftanteil
H_{Ku}	-	hydrodynamischer Faktor nach Kuwabara
I	W/m^2	Intensität des gestreuten Lichts
I_0	W/m^2	Intensität der Lichtquelle
i_1, i_2	-	Intensitätsparameter für gestreutes Licht
K_1	$1/\text{m}$	Filtermittelwiderstand
K_2	m/kg	Staubkuchenwiderstand
k	J/K	Boltzmann-Konstante
L	m	Filtermitteldicke
L_{FE}	m	Länge Filterelement
L_R	m	Rohrlänge
$L_{\text{ZSA},y}$	m	je Filtrationszyklus vertikal zurückgelegter Weg zirkulierender Staubanteile
$L_{\text{ZSA},y,A}$	m	je Filtrationszyklus vertikal zurückgelegter Weg zirkulierender Staubanteile (nur ZSA_A)
$L_{\text{ZSA},y,B}$	m	je Filtrationszyklus vertikal zurückgelegter Weg zirkulierender Staubanteile (nur ZSA_B)

Symbol	Dimension	Erläuterung
l	μm	Abstand zwischen Ladungsträgern
m	-	komplexer Brechungsindex
\dot{m}_D	g/h	Dosierleistung Bürstendispergierer
\dot{m}_G	g/h	Feststoffmassesstrom Staubaustrag
\dot{m}_{rein}	mg/h	Feststoffmassesstrom Reingas
\dot{m}_{roh}	g/h	Feststoffmassesstrom Rohgas
N_{el}	-	Ladungsparameter
N_{p}	-	Partikelanzahl
N_{W}	-	Anzahl benachbarter Filterelemente bei zirkulierenden Staubanteilen (nur ZS_{AB})
$N_{\text{Q},i}, N_{\text{Q},j}$	-	Ladungsanzahl interagierender Partikel i und j
N_{ZSA}	-	Anzahl Wechselwirkungen zirkulierender Staubanteile
P_{eff}	W	effektive Leistungsaufnahme
p	Pa	Druck
p_{at}	Pa	atmosphärischer Luftdruck
p_{D}	bar	Dispergierdruck Bürstendispergierer
$p_{\text{H}_2\text{O}}$	Pa	Wasserdampfpartialdruck
p_{N}	Pa	Druck (Normalbedingungen)
p_{Reg}	bar	Abreinigungsdruck Filtermittelregenerierung
p_{st}	Pa	statischer Druck
Pe	-	Peclet-Zahl
Δp	Pa	Differenzdruck
Δp_{E}	Pa	Enddruckverlust nach Anfiltration
$\Delta p_{\text{E,EF}}$	Pa	Enddruckverlust nach Anfiltration (Einfilteranordnung)
$\Delta p_{\text{E,MF}}$	Pa	Enddruckverlust nach Anfiltration (Mehrfilteranordnung)
Δp_{eff}	Pa	Druckverlust effektiv
Δp_{F}	Pa	Druckverlust Filteranlage
Δp_{FM}	Pa	Druckverlust Filtermittel
Δp_{K}	Pa	Druckverlust durch in das Filtermittel eingelagerte Partikel
Δp_{R}	Pa	Restdruckverlust
$\Delta p_{\text{R,on}}$	Pa	Restdruckverlust nach on-line-Regenerierung
$\Delta p_{\text{R,on,EF}}$	Pa	Restdruckverlust nach on-line-Regenerierung (Einfilteranordnung)
$\Delta p_{\text{R,on,MF}}$	Pa	Restdruckverlust nach on-line-Regenerierung (Mehrfilteranordnung)

Symbol	Dimension	Erläuterung
$\Delta p_{R,0}$	Pa	Restdruckverlust ohne zirkulierende Staubanteile
$\Delta p_{R,0,EF}$	Pa	Restdruckverlust ohne zirkulierende Staubanteile (Einfilteranordnung)
$\Delta p_{R,0,MF}$	Pa	Restdruckverlust ohne zirkulierende Staubanteile (Mehrfilteranordnung)
Δp_{SK}	Pa	Druckverlust Staubkuchen
$\Delta p_{SK,eff}$	Pa	Druckverlust Staubkuchen durch primäres Rohgas
Δp_{ZSA}	Pa	Druckverlust durch zirkulierende Staubanteile
Q	$A \cdot s$	elektrische Ladung
$q_{rein}(x)$	-	Partikelgrößenverteilung Reingas (Verteilungsdichte)
$q_{roh}(x)$	-	Partikelgrößenverteilung Rohgas (Verteilungsdichte)
$Q_0(x), Q_3(x)$	-	Partikelgrößenverteilung (Verteilungssumme)
R	-	Sperreffektparameter
r	μm	Abstand zur Fasermitt
r_p	μm	Abstand zum Partikel
Re	-	Reynolds-Zahl
T_A	K	absolute Temperatur
T_B	K	Temperatur (Betriebsbedingungen)
T_N	K	Temperatur (Normalbedingungen)
$T(x)$	-	Fraktionsabscheidegrad
t	s	Zeit
t_{Abs}	s	Absaugdauer
t_V	ms	elektronische Ventilöffnungszeit
t_Z	s	Zykluszeit
V_{FPS}	m^3	Volumen Filterprüfstand
\dot{V}_N	m^3/h	Volumenstrom (Normalbedingungen)
\dot{V}_B	m^3/h	Volumenstrom (Betriebsbedingungen)
\dot{V}_{rein}	m^3/h	Volumenstrom Reingas
\dot{V}_{Reg}	m^3/h	Volumenstrom Filtermittelregenerierung
\dot{V}_{roh}	m^3/h	Volumenstrom Rohgas
v	cm/s	Filteranströmgeschwindigkeit
v_B	mm/s	Bandgeschwindigkeit Bürstendispergierer
W	g/m^2	Staubflächenmasse
x	μm	Partikelgröße

Symbol	Dimension	Erläuterung
x_M	μm	Partikelgröße (Klassenmitte)
x_{\max}	μm	maximale Partikelgröße
x_{\min}	μm	minimale Partikelgröße
ZSA	-	zirkulierende Staubanteile
ZSA_A	-	zirkulierende Staubanteile (Wechselwirkung mit regeneriertem Filterelement)
ZSA_B	-	zirkulierende Staubanteile (Wechselwirkung mit benachbarten Filterelementen)
ZSA_{ges}	-	zirkulierende Staubanteile gesamt

Griechisch

Symbol	Dimension	Erläuterung
α	-	Streuparameter nach Mie
α_F	-	Faservolumenanteil
ε	-	Porosität
ε_0	$A \cdot s / (V \cdot m)$	Dielektrizitätskonstante im Vakuum
ζ	-	Widerstandsbeiwert
η	$Pa \cdot s$	dynamische Viskosität
Θ	°	Streuwinkel
λ	nm	Lichtwellenlänge
λ_R	-	Rohrreibungszahl
ρ_F	kg/m^3	Fluiddichte
ρ_S	g/cm^3	Schüttdichte Staub
ρ_P	g/cm^3	Feststoffdichte
Φ	N	Coulomb-Kraft
φ	-	Einzelfaserabscheidegrad
φ_D	-	Einzelfaserabscheidegrad (Diffusion)
φ_R	-	Einzelfaserabscheidegrad (Sperreffekt)
φ_T	-	Einzelfaserabscheidegrad (Trägheit)
ψ	-	Trägheitsparameter

1 Einleitung und Motivation

Entstaubungsanlagen leisten seit Jahrzehnten einen wichtigen Beitrag zur Luftreinhaltung. Für die Staubabscheidung kommen häufig Filtrationsprozesse zur Anwendung, welche strengen Anforderungen hinsichtlich möglichst geringer Staubemissionen sowie Investitions- und Betriebskosten gerecht werden müssen. Die Reinigung stark staubbelasteter Gase findet in vielen Fällen mit Oberflächenfiltern wie Schlauch-, Taschen- und Patronenfiltern statt. Trotz stetig steigender Anforderungen blieb das Grundprinzip dieses Filtertyps dennoch unverändert. Als Reaktion auf stetig verringerte Emissionsgrenzwerte fand eine Weiterentwicklung der Filtermittel hinsichtlich besserer Partikelabscheidung und geringerer Druckverluste statt. Hiermit und durch den Einsatz energiesparender Komponenten wurde der steigenden Bedeutung von Energieeffizienzaspekten begegnet. Trotz umfangreicher wissenschaftlicher Erkenntnisse und langjähriger Erfahrungswerte sind in der Praxis jedoch noch immer kaum effiziente Oberflächenfilter anzutreffen, die gleichermaßen effizient Staub abscheiden, energieeffizient arbeiten und entsprechend der jeweiligen Anwendung maßgeschneidert ausgelegt wurden. Als Ursache hierfür ist die Tatsache anzusehen, dass Oberflächenfilter in vielen Anwendungsfällen keine Wertschöpfung besitzen. Demzufolge wird der Errichtung von Oberflächenfiltern wenig Bedeutung beigemessen, obwohl diese Phase entscheidend ist für deren Effizienz und Betriebskosten. Dies stellt ein bisher wenig beachtetes Potenzial dar, welches in Anbetracht der Feinstaub- und Energieeffizienzdiskussion zwingend genutzt werden muss.

Die wesentlichen Aspekte einer effizienten Oberflächenfiltration nach dem Stand der Technik sind Bild 1 zu entnehmen. Neben einem grundlegenden Prozessverständnis ist dabei das Anlagen- und Prozessdesign entscheidend für die Effizienz des Oberflächenfilters. Zusätzlich dazu besteht durch die fortschreitende Digitalisierung der Gesellschaft die Notwendigkeit zur Weiterentwicklung klassischer Filter zu smarten Filtern. Kein Aspekt kann dabei separat betrachtet werden. Vielmehr sind im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung die Wechselwirkungen aller Aspekte untereinander von entscheidender Bedeutung. Mit der vorliegenden Arbeit wird dieses ganzheitliche Verständnis der Oberflächenfiltration unter Berücksichtigung des Spannungsfeldes Industrie 4.0 gefördert. Sie dient als Leitfaden für den Praktiker zur Errichtung und zum Betrieb effizienter und damit zukunftssicherer Oberflächenfilter mit minimierten Staubemissionen und Betriebskosten.

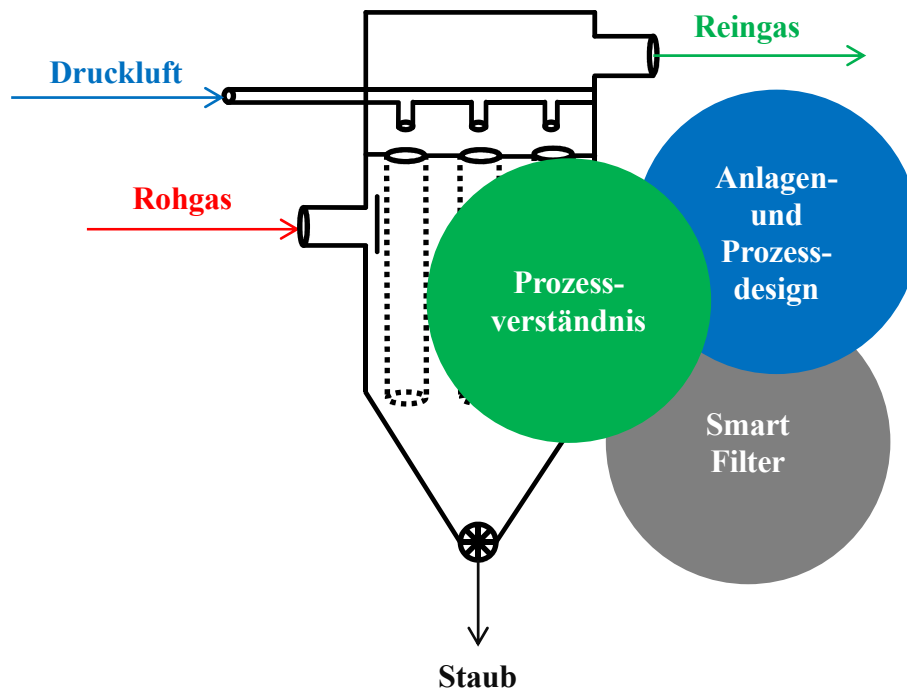


Bild 1: Aspekte einer effizienten Oberflächenfiltration

Wesentliche Elemente des existierenden Grundlagenwissens zur Oberflächenfiltration werden in Kapitel 2 diskutiert. Zirkulierende Staubanteile stellen dabei einen unzureichend untersuchten Effekt dar, obwohl dieser die Effizienz von Oberflächenfiltern erheblich herabsetzen kann. Kapitel 3 führt daher zunächst bereits bekannte Erkenntnisse zusammen und leitet daraus wesentliche konstruktive und prozesstechnische Einflussgrößen auf zirkulierende Staubanteile und deren Dynamik ab. Ein neu entwickelter, methodischer Ansatz zur Bilanzierung zirkulierender Staubanteile ermöglicht darüber hinaus die objektive Beurteilung der energetischen Auswirkungen. Dies dient als wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung von Strategien zur Vermeidung zirkulierender Staubanteile. Eine effiziente Oberflächenfiltration mit ökonomischen und ökologischen Vorteilen wird damit aktiv unterstützt; das bestehende Wissen zu zirkulierenden Staubanteilen und damit zur Oberflächenfiltration erheblich erweitert.

Für die Errichtung effizienter Oberflächenfilter, worunter Planung, Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme zu verstehen sind, müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt werden. Entscheidend dabei sind die exakte Klärung der Aufgabenstellung sowie die Abstimmung der Filteranlagenkonstruktion auf den Prozess (Anlagen- und Prozessdesign). Die Errichtung und der Betrieb effizienter Oberflächenfilter sind deshalb unmittelbar miteinander verbunden, wie Kapitel 4 verdeutlicht. Errichter können diesen Anforderungen nicht allein durch die Kombination

aus fundiertem Grundlagenwissen und praktischen Erfahrungswerten gerecht werden. Eine Absicherung der Auslegungskriterien durch standardisierte Methoden ist zu empfehlen, jedoch teilweise mit erheblichem Aufwand verbunden. Das effiziente Anlagen- und Prozessdesign muss ferner durch die technischen, personellen und finanziellen Rahmenbedingungen des Errichters und Betreibers realisierbar sein, um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen. Um das Potenzial effizienter Oberflächenfilter besser nutzbar zu machen, findet eine ganzheitliche Betrachtung mit Hilfe von Lebenszykluskosten statt. Zugeschnitten auf die unterschiedlichen Zielgruppen sind dabei ökologische, ökonomische und gesellschaftliche Gesichtspunkte zu betrachten und gegeneinander abzuwägen. Zur Veranschaulichung der komplexen Zusammenhänge dienen digitale Produktkonfiguratoren.

Die ganzheitliche Betrachtung von Oberflächenfiltrationsprozessen wird am Beispiel des Rotationsentstaubers als neuartiger Typ Oberflächenfilter demonstriert (Kapitel 5). Durch einen Benchmark mit einem Schlauchfilter wird das Potenzial des Rotationsentstaubers beurteilt, welches sich in der vielversprechenden Vermeidung zirkulierender Staubanteile begründet.

Die stark voranschreitende Digitalisierung als globaler Trend in Wirtschaft und Gesellschaft wirkt sich auch auf Querschnittstechnologien wie z. B. Oberflächenfilter aus, die i.d.R. ein Lowtech-Image besitzen. Trotz enormer Einsparpotenziale und Stückzahlen entziehen sich diese bisher einer detaillierten Betrachtung. In Kapitel 6 werden deshalb die Aspekte von Industrie 4.0 anhand bereits existierender Ansätze und Best-Practice-Beispielen auf Oberflächenfilter angewandt, um die Entwicklung smarter Filteranlagen zu unterstützen. Diese neue Filtergeneration zeichnet sich durch eine höhere Effizienz und Anwendung moderner Instandhaltungsmethoden aus. Eine Roadmap für Errichter und Betreiber von Oberflächenfiltern wird erarbeitet, um diese zukunftsicher auszustatten und die Etablierung smarter Filteranlagen in der Praxis zu beschleunigen.

Durch die vorliegende Arbeit werden die entscheidenden Voraussetzungen für effiziente Oberflächenfilter herausgearbeitet und nutzbar gemacht. Allein das Zusammenspiel aus fundiertem Grundlagenwissen, einem maßgeschneiderten Anlagen- und Prozessdesign sowie smarter Oberflächenfilter ermöglicht es, dieses Ziel zu erreichen. Komplexe Zusammenhänge müssen dabei auf die Bedürfnisse des betrieblichen Alltags angepasst werden. Wesentliche Themenkomplexe für effiziente Oberflächenfilter werden abschließend in Konzeptform gegenübergestellt, was der Fortschreibung des novellierungsbedürftigen Standes der Technik zum Thema Oberflächenfiltration dient.

2 Grundlagen

Die Notwendigkeit zur Errichtung vieler Entstaubungsanlagen ergibt sich aus den jeweiligen rechtlichen Rahmenbedingungen. Diese unterliegen einer Dynamik, welche zu stetig steigenden Anforderungen an Entstaubungsanlagen führt. Aufbau und Betrieb von Oberflächenfiltern sowie deren Bilanzierung werden nachstehend erläutert, wobei eine kritische Diskussion des Standes der Technik in Vorbereitung auf den Beitrag nachfolgender Kapitel erfolgt. Wesentliche bei der Oberflächenfiltration wirkende Abscheidemechanismen erlauben den erforderlichen theoretischen Einblick in den Themenkomplex Oberflächenfiltration.

2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Durch das Umweltbundesamt für Deutschland veröffentlichte, aktuelle Daten zeigen in den letzten 10 Jahren nur einen geringfügigen Rückgang von (Fein)staubemissionen (Bild 2). In Anbetracht des gestiegenen Erkenntnisstandes zur physiologischen Wirkung von Feinstäuben leitet sich daraus ein akuter Handlungsbedarf ab, Staubemissionen weiter zu reduzieren.

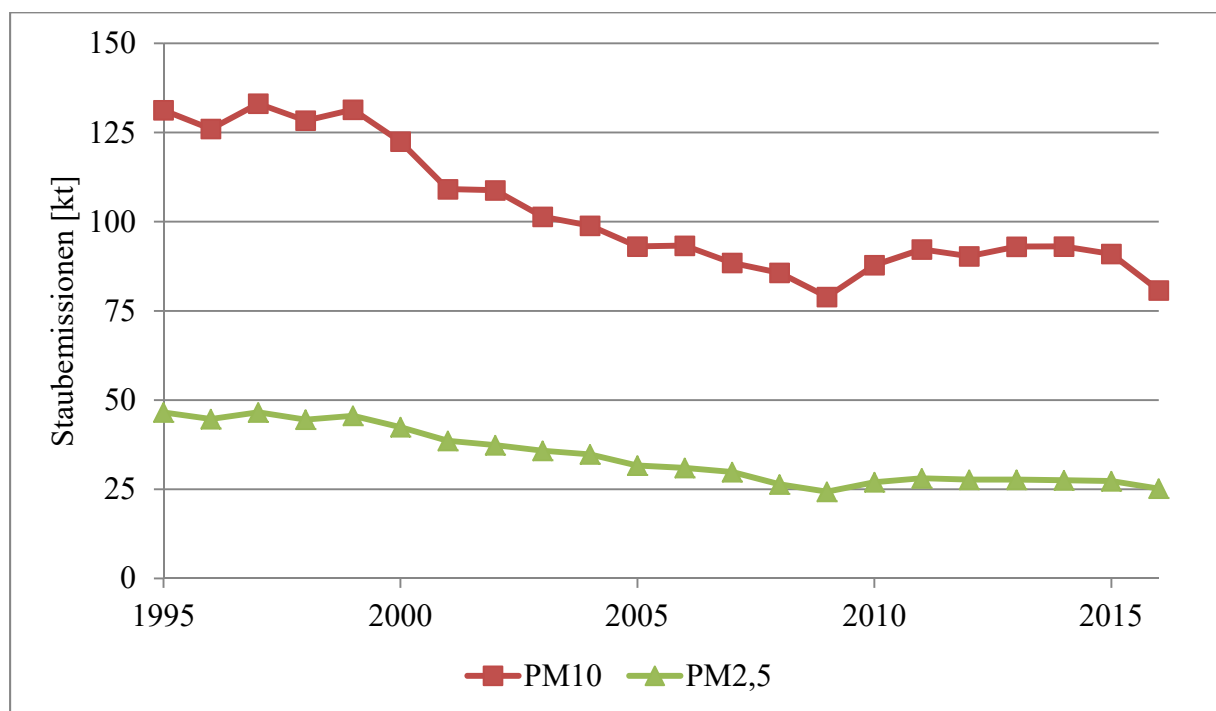


Bild 2: Entwicklung der Staubemissionen von Industrieprozessen in Deutschland [1]

Dies wird auch durch den aktuellen Bericht der europäischen Umweltagentur zur Luftqualität in Europa bestätigt [2]. Demnach stellt die Feinstaubbelastung noch immer ein erhebliches Gesundheitsrisiko dar, welches die durchschnittliche Lebenserwartung erheblich senken kann. Mögliche Folgen sind u. a. Atemwegsbeschwerden, Herz-Kreislauf-Erkrankungen oder Krebs. Das Krankheitsbild kann abhängig von der chemischen Zusammensetzung und Feinheit der Stäube variieren, da körpereigene Schutzmechanismen mit sinkender Partikelgröße tendenziell eine geringere Wirksamkeit aufweisen (siehe Abscheidemechanismen Kapitel 2.2). Die dadurch verursachten Allgemeinkosten werden aktuell durch die Gesellschaft getragen; eine Umlage auf Errichter und Betreiber industrieller Oberflächenfiltern erfolgt nicht.

Eine weitere Absenkung von Emissionsgrenzwerten wird von der Weltgesundheitsorganisation gefordert und durch die fortlaufende Novellierung der Gesetzgebung zumindest anteilig umgesetzt. Innerhalb der Europäischen Union (EU) existieren entsprechend Bild 3 einheitliche Vorgaben und Standards, die sich auf die nationale Gesetzgebung auswirken.

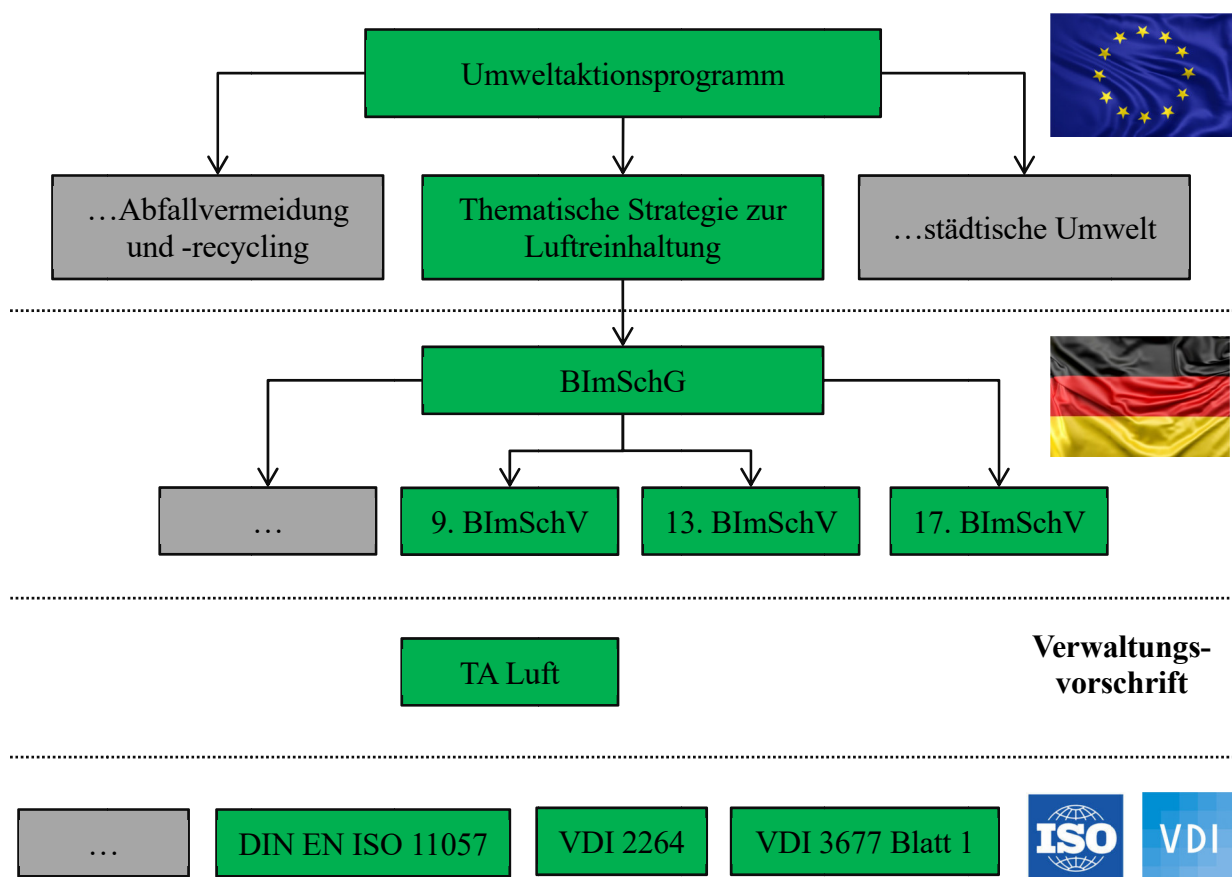


Bild 3: Immissionsschutzrechtliche Vorgaben und Standards in der EU und in Deutschland

Europäischer Rechtsraum

Die Umweltgesetzgebung der EU wird in Form von Umweltaktionsprogrammen initiiert, welche durch thematische Strategien u. a. zur Luftreinhaltung konkretisiert werden. Diese bilden das strategische Grundgerüst zum europäischen Immissionsschutz. Aktuell ist das 7. Umweltaktionsprogramm mit einer Laufzeit bis 2020 gültig [3]. Dieses sieht den Schutz der Bürger vor gefährlichen Feinstäuben kleiner $10\text{ }\mu\text{m}$, $2,5\text{ }\mu\text{m}$, $1\text{ }\mu\text{m}$ vor (PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, PM_1). Eine Konkretisierung des letzten 6. Umweltaktionsprogramms (2002-2012) erfolgte in Form der EU-Richtlinie über Luftqualität und saubere Luft für Europa [4]. Diese regelt die Messung und Beurteilung der Feinstaubkonzentrationen $< 2,5\text{ }\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$). Durch das 6. Umweltaktionsprogramm wird eine Reduzierung der Feinstaubemissionen $\text{PM}_{2,5}$ bis 2020 von 59 % im Vergleich zum Jahr 2000 angestrebt.

Die Genehmigung, der Betrieb, die Überwachung sowie die Stilllegung von Industrieanlagen sind mit der Industrieemissions-Richtlinie [5] europäisch einheitlich geregelt. Diese schreibt vor, beste verfügbare Technik (BVT) speziell im Zuge der Neuerrichtung von Anlagen einzusetzen. Diese BVT-Merkblätter sind für verschiedene Branchen wie z. B. die Eisen- und Stahlerzeugung oder die Glasherstellung veröffentlicht. Gewebefilter, teilweise auch konkret als Schlauchfilter benannt, gelten dabei in vielen Branchen als beste verfügbare Technik, ohne Anforderungen daran zu konkretisieren.

Das Ziel, europaweit einheitliche Standards auch für Oberflächenfilter umzusetzen, wird durch die CE-Kennzeichnung (*Communauté Européenne*) sichtbar gemacht. Dieses Verwaltungszeichen weist auf die Einhaltung geltender EU-Richtlinien hin und ermöglicht die freie Zirkulation von Produkten im europäischen Binnenmarkt [6]. Den Kontrollinstanzen der EU wird damit ferner eine Marktüberwachung ermöglicht.

Deutscher Rechtsraum

Europäische Vorgaben zum Immissionsschutz werden in Deutschland durch das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) [7] umgesetzt. Es dient dem Schutz der Biosphäre vor dem Eintrag schädlicher Luftschadstoffe. Weiterhin dient es als Regelwerk zur Genehmigung und zum Betrieb schadstoffemittierender Anlagen. Diese sind nach Stand der Technik zu errichten, wobei nach § 3 Abs. 6 BImSchG Kriterien wie Energieeffizienz und ein fortschreitender Stand wissenschaftlicher Erkenntnisse berücksichtigt werden müssen.

Während das BImSchG im Wesentlichen grundsätzliche Aspekte der Gesetzgebung regelt, werden die Details mit Durchführungsbestimmungen in Form von Bundesimmissionsschutzverordnungen (BImSchV) festgelegt. Diese stellen eine Konkretisierung des BImSchG nach Entstehungsanwendung oder Branche dar. Eine Auswahl branchenspezifischer BImSchV mit Angaben zu Emissionsgrenzwerten enthält Tabelle 1. Je nach Anwendungsfall existieren unterschiedliche Emissionsgrenzwerte. Oberflächenfilter ermöglichen eine sichere Einhaltung (und z. T. auch Unterschreitung) der festgesetzten Grenzwerte, falls der fortgeschriebene Stand der Technik zur Anwendung kommt.

Tabelle 1: Emissionsgrenzwerte ausgewählter BImSchV

Verordnung	Fassung	Geltungsbereich	Grenzwert
1. BImSchV [8]	10.03.2017	kleine und mittlere Feuerungsanlagen	20 mg/m ³ *
13. BImSchV [9]	31.08.2015	Großfeuerungsanlagen, Einsatz fester Brennstoffe	10 mg/m ³ * ¹
17. BImSchV [10]	02.05.2013	Verbrennung und Mitverbrennung von Abfällen, Abfallverbrennungsanlagen	5 mg/m ³ * ¹
25. BImSchV [11]	24.03.2017	Titandioxid-Industrie	30 mg/m ³ * ¹
30. BImSchV [12]	27.09.2017	biologische Behandlung von Abfällen	10 mg/m ³ * ¹

* Anlage ab 2015 errichtet, Nennwärmeleistung ≥ 4 kW, Brennstoff Scheitholz

*¹ Gesamtstaub (Tagesmittelwert)

Die übliche masseabhängige Angabe der Emissionsgrenzwerte ist dabei kritisch zu betrachten, da die Staubkonzentration allein keine aussagekräftigen Rückschlüsse auf deren Gefährdungspotenzial zulässt. Entscheidend ist hierfür die Partikelgröße, wobei feinere Partikel tendenziell leichter vom menschlichen Körper aufgenommen werden. Viele kleine Partikel besitzen dabei verhältnismäßig wenig Masse jedoch eine große spezifische Oberfläche, was die Bioakkumulation erleichtert. Die Angabe von Staubemissionen wird deshalb in den Mengenarten Anzahl und Oberfläche empfohlen, was mehr über die physiologische Wirkung und somit das Gefährdungspotenzial auf Mensch und Natur aussagt.

Das Genehmigungsverfahren für die Errichtung und den Betrieb genehmigungsbedürftiger Anlagen regelt die 9. BImSchV [13]. Laut § 4d müssen bereits mit den Antragsunterlagen Angaben zur Energieeffizienz mit eingereicht werden. Dies betrifft Informationen zur Beschränkung von Energieverlusten, welche nicht näher beschrieben werden. An dieser Stelle sind Konkretisierungen hinsichtlich Energieeffizienz von Oberflächenfiltern erforderlich. Geben die BImSchV keinen ausreichenden Rahmen vor, gilt die „Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bun-

desimmissionsschutzgesetz“ (1. BImSchVwV). Diese stellt die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) dar [14]. Sie regelt die Anforderungen an genehmigungsbedürftige Anlagen der 4. BImSchV [15] und ist bei allen immissionsschutzrechtlichen Verfahren anzuwenden. Weiterhin wird auf eine Eigenverantwortung der Anlagenerrichter und –betreiber hinsichtlich Fortschreibung des Standes der Technik verwiesen. Innerhalb der Gesetzgebungshierarchie in Deutschland können auch Normen und Richtlinien von erheblicher Bedeutung sein, die den Stand der Technik gut widerspiegeln und im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit noch genutzt werden [16].

Die erläuterten immissionsschutzrechtlichen Vorgaben zielen auf eine effiziente Staubabscheidung bei der Oberflächenfiltration ab. Eine Steigerung der Energieeffizienz führt dabei auch zur Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen. Die Bundesrepublik Deutschland unterzeichnete 2015 das *Übereinkommen von Paris* (UN-Klimakonferenz COP 21) und verpflichtete sich damit zur Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen. Laut Klimaschutzplan der Bundesregierung [17] wurde der Industriesektor in Deutschland 2014 mit 20 % als zweitgrößter Emittent von Treibhausgasen identifiziert (181 Mio. t CO₂-Äquivalent). Hinzu kommt noch ein erheblicher Einfluss der Industrie auf den Energiesektor infolge von Fremdstrombezug. Global betrachtet sind die Bemühungen zur Steigerung der Energieeffizienz als unzureichend einzuschätzen, da für 2017 sogar ein Anstieg des CO₂-Ausstoßes um 2 % errechnet wurde, wie durch den Forscherverbund *Global Carbon Project* im Rahmen der UN-Klimakonferenz 2017 in Bonn (COP 23) bekannt gegeben wurde [18]. Gegenüber den drei Vorjahren mit einer Stagnation stellt dies eine erhebliche Verschlechterung dar.

2.2 Abscheidemechanismen bei der Entstaubung

Für ein grundlegendes Verständnis von Filtrationsprozessen ist die Kenntnis der wirkenden Mechanismen erforderlich, welche zur Abscheidung von Partikeln führen. Bestimmte Partikelgrößen können physikalisch bedingt nicht vollständig abgeschieden werden, worin sich auch das erhebliche Gefährdungspotenzial von Feinstäuben begründet. Aus diesem Grund stellt die Minimierung von Staubemissionen einen aktiven Immissionsschutz dar. Die nachfolgend vorgestellten Modellvorstellungen besitzen ihre Gültigkeit für nicht bestaubte Fasern zu Beginn der Filtration. Die Abhängigkeit des Einzelfaserabscheidegrades ϕ von der Partikelgröße wird durch Bild 4 in Anlehnung an [19 p. 35] verdeutlicht.

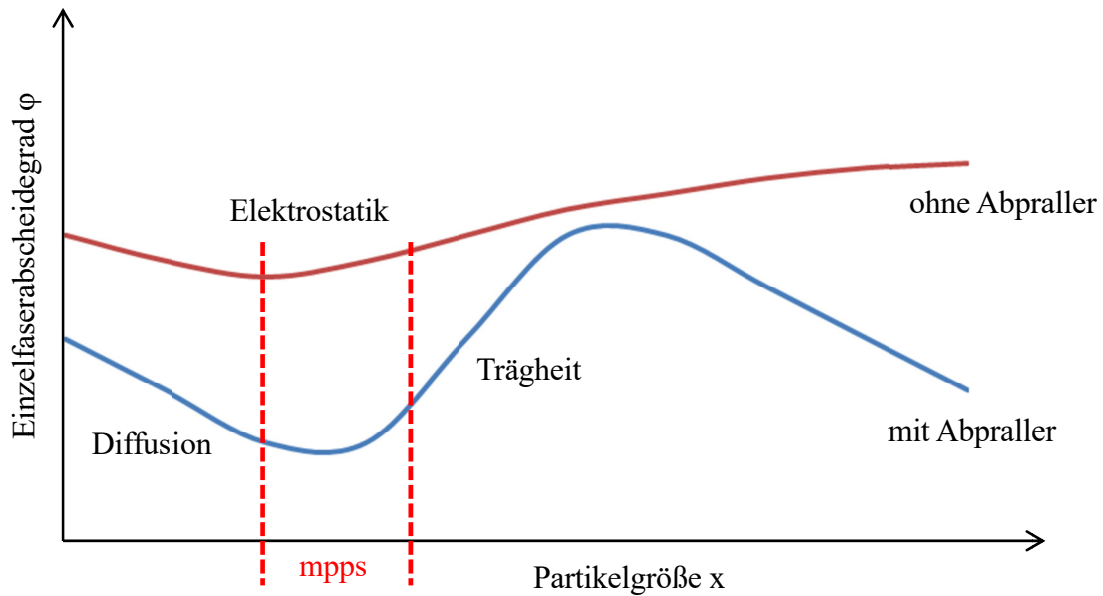


Bild 4: Einzelfaserabscheidegrad als Funktion der Partikelgröße

Kleine Partikel werden stärker durch Diffusionsbewegung abgeschieden; grobe Partikel stärker durch Trägheitskräfte (blaue Kurve). Bei hohen Filteranströmgeschwindigkeiten können an der Faser abprallende Partikel den Einzelfaserabscheidegrad deutlich herabsetzen. Auffällig ist das lokale Minimum der Kurven zwischen Diffusions- und Trägheitsabscheidung. In diesem Partikelgrößenbereich greifen beide Abscheidemechanismen nur anteilig, womit ein erhöhtes Risiko besteht, dass bestimmte Partikelklassen nicht abgeschieden werden. Dieser Bereich wird als *most penetrating particle size (mpps)* bezeichnet und stellt den potenziellen Schwachpunkt jedes Filtermittels zur Entstaubung dar. Es handelt sich um Partikelgrößen von ca. 0,1 – 0,3 µm. Elektrostatische Effekte (rote Kurve) können prinzipiell alle anderen Effekte überlagern.

Partikel werden auf einer unbestaubten Faser abgeschieden, wenn diese auf der Faser auftreffen und anschließend haften bleiben [20 p. 165]. Der Einzelfaserabscheidegrad φ ist damit entsprechend Formel (1) das Produkt aus Auftreffgrad AG und Haftanteil H. Die Transportmechanismen, die ein Auftreffen von Partikeln auf die Faser bewirken, sowie die Einflussgrößen auf die Haftung der Partikel an der Faser werden nachfolgend kurz erläutert.

$$\varphi = AG \cdot H \quad (1)$$

2.2.1 Transportmechanismen

Der Auftreffgrad AG wird von verschiedenen Transportmechanismen beeinflusst. Abhängig von den wirkenden Kräften existieren dazu entsprechende Berechnungsansätze. Diese sind [20 pp. 167–196, 21] zu entnehmen, wobei die Mechanismen einzeln oder kombiniert Anwendung finden. Nach Auftreffen der ersten Partikel verändert sich das Staubabscheideverhalten verhältnismäßig schnell. Wesentliche Transportmechanismen werden anhand von Bild 5 in Anlehnung an [22 p. 13, 19 p. 25] visualisiert. Dies erfolgt mittels einer exemplarischen Faser mit dem Faserdurchmesser D_F und eines Partikels mit dem Durchmessers D_P .

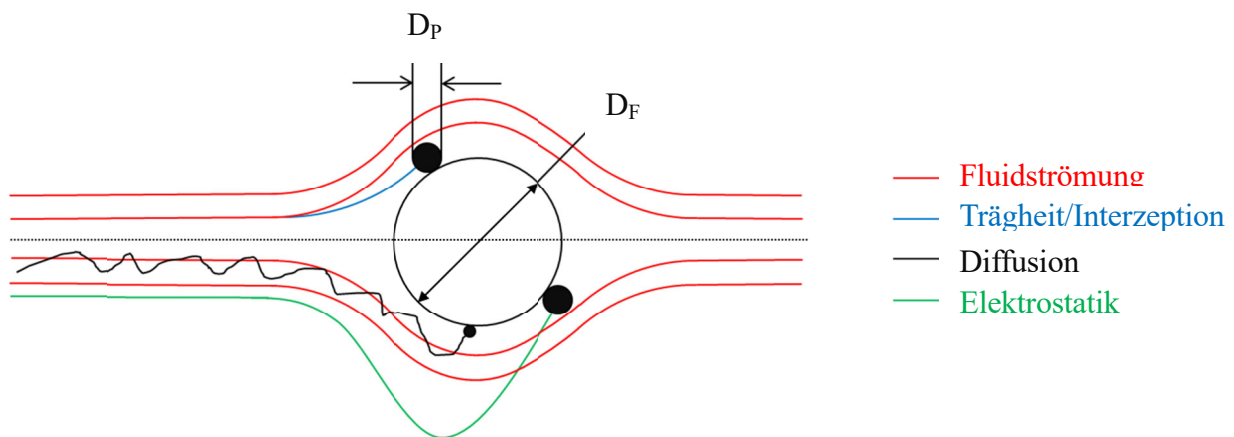


Bild 5: Transportmechanismen zur Abscheidung eines Partikels an einer Faser

Trägheit

Partikel können der Fluidströmung (rote Bewegungsbahn Bild 5) aufgrund der Massenträgheit um die Fasern z. T. nicht folgen, verlassen die Strömung um die Fasern und treffen auf diese (blaue Bewegungsbahn Bild 5). Dieser Effekt ist bei groben Partikeln mit großen Massenkräften und kleinen Fasern stark ausgeprägt. Die Trägheit von Partikeln lässt sich mit dem Trägheitsparameter ψ entsprechend Formel (2) beschreiben [19 p. 28]. Dabei stellt ρ_P die Partikeldichte, x die Partikelgröße, v die Anströmgeschwindigkeit, η die dynamische Viskosität des Fluids und Cu die Cunningham-Korrektur dar.

$$\psi = \frac{\rho_P \cdot x^2 \cdot v}{18 \cdot \eta \cdot D_F} \cdot Cu \quad (2)$$

Mit der Cunningham-Korrektur C_u wird der Einfluss sehr kleiner Partikel berücksichtigt. Erst wenn sich deren Größe der freien Weglänge der Luftmoleküle nähert (ca. $0,065 \mu\text{m}$ im Normalzustand), muss dieser Faktor berücksichtigt werden. Der Einzelfaserabscheidegrad aufgrund von Trägheit φ_T berechnet sich nach [23] entsprechend Formel (3) mit Re als Reynolds-Zahl und ψ als Trägheitsparameter.

$$\varphi_T = 1,03 + (0,5 \cdot Re - 1,5) \cdot 0,85^{(\psi+0,5)} \quad (3)$$

Gültigkeitsbereich:

$$1 < \psi < 10$$

$$0,01 < Re < 1$$

$$\varphi_T > 0,1$$

Bei Filtration verhältnismäßig großer Partikel kann als Sonderfall allein die geometrische Ausdehnung der Partikel zur Abscheidung führen (*Interzeption*). Dieser Zusammenhang wird durch den Sperreffektparameter R beschrieben [22 p. 14], der sich nach Formel (4) aus Partikel- und Faserdurchmesser ergibt. Mit steigender Partikelgröße erhöht sich somit bei gleichbleibendem Faserabstand die Auftreffwahrscheinlichkeit eines Partikels auf eine Faser.

$$R = \frac{D_P}{D_F} \quad (4)$$

Nach [24] kann der durch den Sperreffekt verursachte Einzelfaserauftreffgrad φ_R nach Formel (5) berechnet werden. Dabei stellen α_F den Faservolumenanteil und ε die Porosität dar (Formel (6)); H_{Ku} beschreibt den hydrodynamischen Faktor nach Kuwabara (Formel (7)).

$$\varphi_R = \left(\frac{1 - \alpha_F}{H_{Ku}} \right) \cdot \left(\frac{R^2}{1 + R} \right) \quad (5)$$

$$\alpha_F = 1 - \varepsilon \quad (6)$$

$$H_{Ku} = 0,5 \cdot \ln \alpha_F - 0,75 + \alpha_F - 0,25 \cdot \alpha_F^2 \quad (7)$$

Diffusion

Verursacht durch die Brown'sche Molekularbewegung können verhältnismäßig kleine Partikel von den Bewegungsbahnen abweichen, die sich durch die lokalen Strömungsbedingungen ergeben (schwarze gezackte Bewegungsbahn Bild 5). Dieser Effekt wird nach [22 p. 13] durch die Peclet-Zahl Pe entsprechend Formel (8) beschrieben.

$$Pe = \frac{v \cdot D_F}{D} \quad (8)$$

D stellt den Partikel-Diffusionskoeffizienten dar, der sich nach [19 p. 26] mit der Boltzmann-Konstante k und T_A als absoluter Temperatur entsprechend Formel (9) berechnet. Diffusionsabscheidung tritt verstärkt bei Partikeln unter $1 \mu\text{m}$ auf.

$$D = \frac{k \cdot T_A}{3 \cdot \Pi \cdot x \cdot \eta} \cdot Cu \quad (9)$$

Der sich infolge der Diffusion ergebende Einzelfaserabscheidegrad φ_D berechnet sich nach [24] nach Formel (10).

$$\varphi_D = 2,6 \cdot \left(\frac{1 - \alpha_F}{H_{Ku}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Pe^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

Elektrostatik

Der Einfluss elektrostatischer Kräfte kann nach [19 p. 28] mit dem Ladungsparameter N_{el} durch Formel (11) beschrieben werden (grüne Bewegungsbahn Bild 5). Dabei stellt $F_e(r)$ die elektrostatische Kraft in Abhängigkeit des Abstandes von der Fasermittelpunkt r dar. Diese hängt von den jeweiligen Ladungszuständen der beteiligten Partner ab. Mit zunehmender Partikelgröße und damit einhergehendem Anstieg der Trägheitskräfte nimmt der Einfluss der Elektrostatik somit ab.

$$N_{el} = \frac{F_e(r)}{3 \cdot \Pi \cdot \eta \cdot x \cdot v} \quad (11)$$

Für den Fall zweier Punktladungen wirkt nach Formel (12) bei Vernachlässigung der Induktionskräfte die Coulomb-Kraft Φ [25 p. 200], welche in Formel (11) als elektrostatische Kraft fungieren kann ($F_e(r) = \Phi$). Dabei stellen $N_{Q,i}$ und $N_{Q,j}$ die Anzahl der Ladungen der interagierenden Partikel, Q die elektrische Ladung, l den Abstand zwischen den Ladungsträgern und ε_0 die Dielektrizitätskonstante im Vakuum dar.

$$\Phi = \frac{N_{Q,i} \cdot N_{Q,j} \cdot Q^2}{\varepsilon_0 \cdot l} \quad (12)$$

Somit ist der Einfluss der Elektrostatik maßgeblich von der Aufladung der Partikel, des Filtermittels sowie vom Abstand zwischen den Ladungen abhängig. Bei der Oberflächenfiltration können elektrostatische Effekte in unterschiedlichen Formen in Erscheinung treten und maßgeblichen Einfluss auf den Prozess nehmen. Auf die Erläuterung weiterer Transportvorgänge, die für die vorliegende Arbeit von untergeordneter Bedeutung sind, wird an dieser Stelle verzichtet und auf weiterführende Literatur verwiesen [25, 26].

2.2.2 Haftanteil

Neben dem Auftreffgrad AG ist für den Einzelfaserabscheidegrad der Haftanteil H entscheidend. Die Voraussetzung für das Haften von Partikeln an einer Faser ist im Wesentlichen eine ausreichend große Haftkraft, die ein Ablösen bzw. Abschlagen der Partikeln von der Faser verhindert [20 p. 174]. Bei moderater Filteranströmgeschwindigkeit wird diese Voraussetzung i. d. R. erfüllt. Eine vereinfachte Approximation zur Berechnung des Haftanteils wird durch [20 p. 181] mit der Formel (13) ausgewiesen. Re stellt dabei die Reynolds-Zahl dar. Ab einer bestimmten Geschwindigkeit nimmt der Haftanteil wieder ab, da zunehmend Partikel abprallen. Nach [27 p. 44] ist dieser Effekt ab Partikelgrößen von $3 \mu\text{m}$ und Filteranströmgeschwindigkeiten von über 20 cm/s stark ausgeprägt. Die Wahrscheinlichkeit des Abprallens von Partikeln steigt auch mit Zunahme der Partikelelastizität. Zur Berechnung der kritischen Geschwindigkeit kann [20 p. 175] herangezogen werden. Unter Umständen können Partikel auch bereits bei deutlich geringeren Geschwindigkeiten abprallen.

$$H = 1,368 \cdot \psi^{-1,09} \cdot \text{Re}^{-0,37} \quad (13)$$

Gültigkeitsbereich:

$$1 < \psi < 20$$

$$0,01 < \text{Re} < 1$$

$$H > 0,1$$

2.3 Aufbau von Oberflächenfiltern

Oberflächenfilter kommen in nahezu allen Wirtschaftszweigen zur Abscheidung großer Staubmengen zum Einsatz. Weit verbreitet sind dabei Schlauch-, Taschen- und Patronenfilter. Diese können für vielfältige Anwendungsfälle mit zu filtrierenden Volumina von über 1 Mio. m³/h und Rohgasstaubkonzentrationen von mehreren 100 g/m³ sehr flexibel eingesetzt werden. Neben der Zielstellung, spezifische Emissionsgrenzwerte einzuhalten, kann auch die Produktrückgewinnung den entscheidenden Zweck der Entstaubungsanwendung darstellen. Zum Stand der Technik zur Oberflächenfiltration existiert die VDI-Richtlinie 3677 Blatt 1 [28].

Der grundsätzliche Aufbau eines Oberflächenfilters wird nachfolgend exemplarisch am Beispiel eines Schlauchfilters (Einkammerausführung) erläutert (Bild 6). Das zu reinigende Rohgas gelangt über einen meist seitlich angebrachten Einlass in den Rohgasraum. Eine Vorabscheidung grober Partikel kann durch ein am Rohgaseintritt angebrachtes Prallblech erfolgen, welches eine Beschädigung der Filterelemente durch direkt auf das Filtermittel treffende Stäube verhindert sowie das Filtermittel entlastet. Der Staub sammelt sich im unteren, konisch ausgeführten, Bereich des Filters (Staubbunker) und endet in einem Austragsorgan, mit dem der abgeschiedene Staub aus dem Filter ausgetragen wird. Zur Abscheidung der Stäube werden Filterelemente (hier Schläuche) verwendet, welche an durch eine Kopfplatte getragenen Stützkörben fixiert werden. Die Kopfplatte trennt den Rohgasraum konstruktiv vom Reingasraum. Durch einen Stutzen tritt das Reingas aus dem Filter aus. Der auf den Filterelementen abgeschiedene Staub wird periodisch durch einen reingasseitigen Druckluftstoß abgereinigt (Filtermittelregenerierung). Dazu steht ein Abreinigungssystem mit kurzzeitig öffnenden Ventilen und Düsen direkt über den Öffnungen der Filterelemente zur Verfügung.

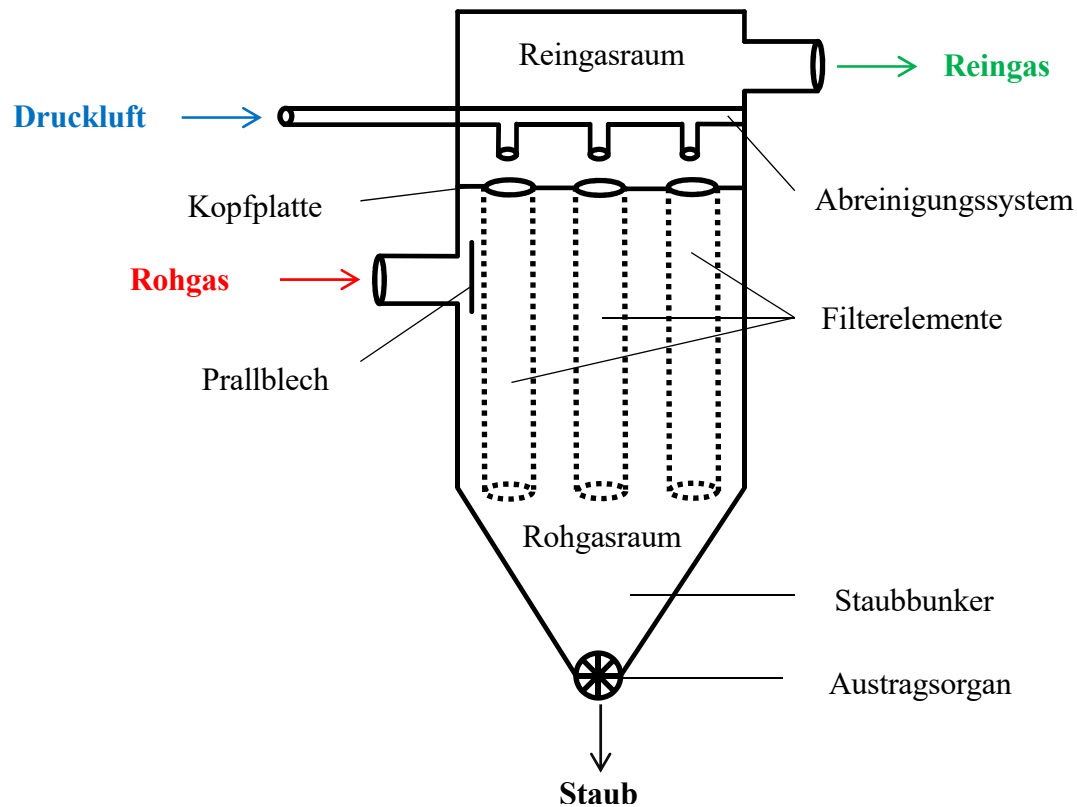


Bild 6: Aufbau Oberflächenfilter

Im Rohgasraum ist möglichst viel Filterfläche prozesstechnisch sinnvoll zu integrieren. Größere Filter besitzen oft mehrere Kammern, um diese bedarfsgerecht zu- oder abzuschalten. Bei Schlauchfiltern werden Schläuche mit Durchmessern von ca. 100–160 mm und Längen von mehreren Metern eingesetzt. Diese Filterelemente werden in Reihen angeordnet, deren Abstand (Gassenabstand) durch prozesstechnische Parameter bestimmt wird (siehe Kapitel 2.4). Der Austausch der Filterelemente sollte aus arbeitsschutztechnischen Gründen reingasseitig erfolgen.

2.4 Betrieb von Oberflächenfiltern

Der Betrieb eines Oberflächenfilters ist geprägt durch eine starke Wechselwirkung zwischen konstruktivem Aufbau und Prozessführung. Diese wird nachfolgend anhand wesentlicher Prozessparameter entsprechend ihrer Abfolge im Filtrationsprozess kompakt vorgestellt. Zunächst betroffen ist dabei die Anströmung des Rohgases, gefolgt vom Aufbau des Staubkuchens und dessen Abreinigung.

2.4.1 Rohgasanströmung

Die Filterflächenbelastung FFB ergibt sich entsprechend Formel (14) aus der Aufgabenstellung mit einem zu filtrierenden Volumenstrom \dot{V}_{roh} und der konstruktiven Umsetzung mit einer effektiv nutzbaren Filterfläche A_{eff} . Dieser wesentliche Prozessparameter legt fest, mit welcher Rohgasmenge je Zeit- und Flächeneinheit der Filter beaufschlagt wird (Einheit $m^3/(m^2 \cdot h)$). Gleichzeitig stellt dieser Parameter auch die Anströmgeschwindigkeit des Rohgases auf das Filtermittel dar.

$$FFB = \frac{\dot{V}_{roh}}{A_{eff}} \quad (14)$$

Die Filterflächenbelastung nimmt entscheidenden Einfluss auf die Größe und Prozessstabilität des Oberflächenfilters. Eine zu hoch gewählte Filterflächenbelastung verursacht hohe Druckverluste und beschleunigt die Alterung des Filtermittels durch irreversible Staubeinlagerungen. Weiterhin ist das Filtermittel häufiger und intensiver zu regenerieren. Wechselwirkungen abgereinigter Stäube mit der Filtermittelloberfläche werden begünstigt. Der als zirkulierende Staubanteile bekannte Effekt erhöht dabei zusätzlich die Betriebskosten von Oberflächenfiltern. Gering gewählte Filterflächenbelastungen begünstigen im Gegensatz dazu stabile Anlagenzustände, erhöhen jedoch die Filterfläche und damit die Größe und Anschaffungskosten des Filters.

Der Eintritt des Rohgases in den Prozessraum sollte zu einer abwärts gerichteten Strömung führen (*top-down*), um eine Staubvorabscheidung zu bewirken und die Gefahr der Wiederaufwirbelung bereits sedimentierter Stäube zu verringern. Für eine optimale Ausnutzung der Filterfläche sollte das Rohgas anschließend gleichmäßig im Rohgasraum verteilt werden.

2.4.2 Druckverlustentwicklung und Aufbau des Staubkuchens

Ziel der Oberflächenfiltration ist eine Partikelabscheidung auf der Oberfläche des Filtermittels. Oberflächenfilter finden bevorzugt bei Filtration verhältnismäßig hoher Rohgasstaubkonzentrationen ab mehreren Gramm je Kubikmeter Anwendung [19 p. 1, 20 p. 205]. Den entscheidenden Vorteil der Oberflächenfiltration stellt die reversible Prozessführung mit Regenerierbarkeit des Filtermittels dar, womit der auf dem Filtermittel abgeschiedene Staub wieder aus dem Prozessraum entfernt werden kann.

Auch bei Filtermitteln für Oberflächenfiltrationsprozesse findet eine anteilige Einlagerung von Partikeln im Filtermittel statt. Diese lagern sich nach [20 p. 207] bevorzugt in den oberen Faserschichten ein. Der infolge irreversibler Partikeleinlagerungen verursachte Druckverlust ist einer theoretischen Betrachtung bisher weitestgehend unzugänglich [28 p. 9]. Der Druckverlust des Filtermittels einschließlich darin eingelagerter Partikel ist folglich eine dynamische Größe, die ausgehend vom Neuzustand schnell ansteigt (Konditionierungsphase). Im Anschluss daran ist ein langsamer, stetiger Anstieg des Filtermittelwiderstands mit zunehmender Standzeit des Filtermittels zu beobachten. Im Kontext der vorliegenden Arbeit wird unter Standzeit die Nutzungsdauer eines Filtermittels verstanden.

Die Oberflächenfiltration ist mit einem Druckverlust Δp verbunden (auch Differenzdruck zwischen Roh- und Reingasseite des Filters). Dieser setzt sich nach klassischer Theorie entsprechend Formel (15) aus dem Druckverlust des Filtermittels (Δp_{FM}) und des Staubkuchens (Δp_{SK}) zusammen [19 p. 21]. Das Gesetz von Darcy, welches eine grundlegende Beschreibung der Durchströmung poröser Medien darstellt, kann für laminare Bedingungen entsprechend Formel (16) auf Filtermittel und Staubkuchen angewandt werden.

$$\Delta p = \Delta p_{FM} + \Delta p_{SK} \quad (15)$$

$$\Delta p = K_1 \cdot \eta \cdot v + K_2 \cdot \eta \cdot v \cdot W(t) \quad (16)$$

Der Druckverlust von Oberflächenfiltrationsprozessen ist maßgeblich von der flächenspezifischen Menge des auf dem Filtermittel abgeschiedenen Staubs (Staubflächenmasse) abhängig. Für die Druckverlustberechnung des Staubkuchens (2. Term Formel (16)) sind neben Fluidviskosität und Filteranströmgeschwindigkeit der Staubkuchenwiderstand K_2 (Formel (17)) mit B_2 als Durchlässigkeit des Staubkuchens erforderlich. Weiterhin werden ρ_p als Feststoffdichte und ε als Porosität des Staubkuchens benötigt. Die Staubflächenmasse $W(t)$ kann nach Formel (18) berechnet werden und setzt sich aus dem Gesamtabscheidegrad des Filters E , der Rohgasstaubkonzentration c_{roh} , der Filteranströmgeschwindigkeit v und der Zeit t zusammen. Die Filtermittel- und Staubkuchenwiderstände können nach [19 p. 44] experimentell ermittelt werden.

$$K_2 = \frac{1}{B_2 \cdot \rho_p \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (17)$$

$$W(t) = E \cdot c_{roh} \cdot v \cdot t \quad (18)$$

Der Druckverlust des Filtermittels (1. Term Formel (16)) berechnet sich aus dem Filtermittelwiderstand K_1 entsprechend Formel (19) mit L als Filtermitteldicke und B_1 als Durchlässigkeit des Filtermittels. Weiterhin sind die dynamische Viskosität des Fluids η und die Filteranströmgeschwindigkeit v zu berücksichtigen.

$$K_1 = \frac{L}{B_1} \quad (19)$$

Anhand der Art des Differenzdruckverlaufs über der Zeit können Rückschlüsse auf die Prozessstabilität der Oberflächenfiltration gezogen werden. Voraussetzung hierfür ist eine konstante Rohgasstaubkonzentration. Bild 7 zeigt drei typische Verläufe jeweils am Beispiel eines Filtrationszyklus als Zeitraum t_z zwischen zwei Filtermittelregenerierungen. Die Filtermittelregenerierung erfolgt beim Druckverlust Δp_E ; Δp_R stellt den Restdruckverlust nach Regenerierung des Filtermittels dar.

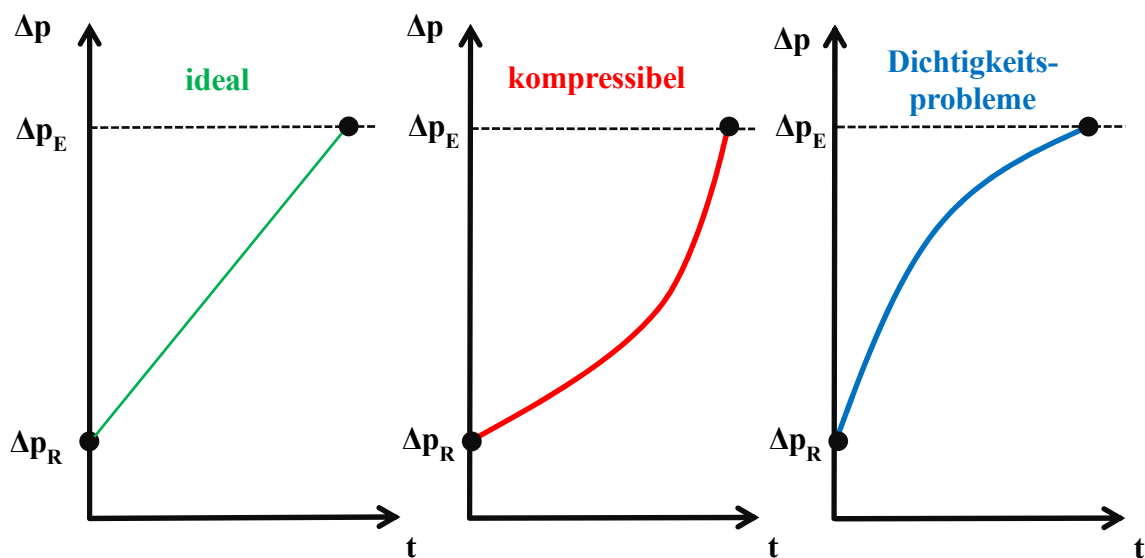


Bild 7: Differenzdruckverläufe eines Filtrationszyklus bei der Oberflächenfiltration

Ein linearer Zusammenhang (grüne Linie) liegt bei einem inkompressiblen Staubkuchen vor, was einem idealen Verlauf entspricht. Ein progressiver Verlauf des Differenzdrucks (rote Kurve) deutet auf einen kompressiblen Staubkuchen hin, was auf eine zu hohe Filterflächenbelastung hinweist und einen instabilen Prozess darstellt. Erhöhte Differenzdrücke und verkürzte Filtrationszyklen sind als wesentliche Nachteile zu nennen. Probleme mit der Dichtigkeit der Filteranlage deuten sich durch einen degressiven Anstieg des Differenzdrucks an (blaue Kurve).

Die Eigenschaften des aufgebauten Staubkuchens sind entscheidend für die spätere Abreinigung. Ideal sind kompakte Strukturen, die sich im Ergebnis des reingasseitigen Druckluftstoßes gut vom Filtermittel lösen. Der dafür notwendige hohe Strömungswiderstand stellt bezüglich der Minimierung der Druckverluste jedoch ein im Vergleich zur Anfiltration des Staubkuchens konträres Ziel dar. Dieser Kompromiss verdeutlicht eine zentrale Herausforderung der Oberflächenfiltration.

Speziell bei sehr feinen Stäuben und geringen Rohgasstaubkonzentrationen (z. B. Biomassefeuerung) gestaltet es sich problematisch, einen gut abzureinigenden Staubkuchen aufzubauen. In diesem Fall kann vor Zugabe des Prozessrohgasen zusätzlich ein leicht filtrierbarer Staub dosiert werden (*Precoatieren*), wodurch sich ein gut abzureinigender Staubkuchen ausbildet [29 p. 199, 27 p. 57, 30]. Nachteile des Precoatierens sind ein erhöhter apparativer Aufwand sowie zusätzliche Entsorgungskosten für das Precoat-Material.

2.4.3 Filtermittelregenerierung und Emissionsverhalten

Oberflächenfilter müssen aus den genannten Gründen regelmäßig regeneriert werden. Dies liegt an dem mit zunehmender Staubflächenmasse ansteigendem Druckverlust zwischen Roh- und Reingasseite. Ziel der Regenerierung ist es, den am Filtermittel abgeschiedenen Staub möglichst vollständig zu entfernen und damit den Druckverlust zwischen Roh- und Reingasseite deutlich zu reduzieren. Die Regenerierung des Filtermittels mit Ablösung des Staubkuchens beruht nach [29 p. 164] auf folgenden nutzbaren Kräften, die durch Bild 8 verdeutlicht werden:

- Rückspülen durch Strömungskräfte infolge der Durchströmung des Filtermittels in Richtung des Staubkuchens,
- Trägheitskräfte durch plötzliche Beschleunigung und Verzögerung des Filtermittels,
- Scherkräfte in der Staubschicht sowie zwischen Staubschicht und Filtermedium infolge Verformung des Filtermittels.

Bei der Filtermittelregenerierung durch einen reingasseitigen Druckluftstoß wirken alle o. g. Kräfte in Kombination. Entscheidend sind Trägheits- und Scherkräfte. Die Intensität der Filtermittelregenerierung setzt sich aus dem Druckniveau und der Geschwindigkeit des Druckanstiegs über der Zeit $\Delta p/\Delta t$ zusammen.

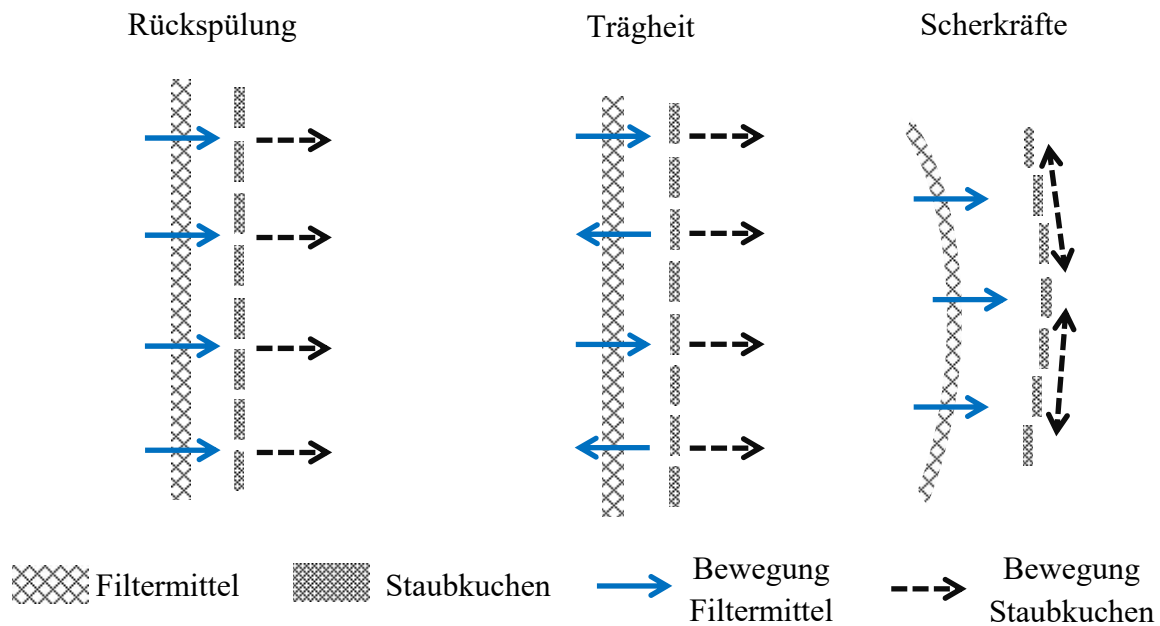


Bild 8: Wirkende Kräfte zur Ablösung des Staubkuchens

Die Effizienz der Filtermittelregenerierung ist auch von der Betriebsweise des Filters abhängig. Es wird unterschieden zwischen Regenerierung bei laufendem Filtrationsprozess (on-line-Regenerierung) und bei abgeschaltetem Volumenstrom (off-line-Regenerierung). Durch die bei der Filtration wirkenden Kräfte (Differenzdruck zwischen Roh- und Reingasseite) sind für die off-line-Regenerierung bei vergleichbarer Intensität bessere Ergebnisse zu erwarten. Die Regenerierung von Oberflächenfiltern mit mehreren Filterelementen erfolgt i. d. R. reihenweise und on-line. Bei Mehrkammerfiltern werden z. T. einzelne Kammern von der Absaugung getrennt und off-line regeneriert, wozu jedoch größere Filter als Redundanzen erforderlich sind. Die Filtermittelregenerierung kann in festen Zeitintervallen (zeitgesteuert) oder bei Erreichen eines definierten Differenzdrucks (differenzdruckgesteuert) erfolgen.

Der Staubkuchen sollte sich für die Regenerierung möglichst als kompaktes Gebilde z. B. in Schollenform leicht vom Filtermittel lösen und anschließend allein unter Wirkung der Schwerkraft den Prozessraum des Filters nach unten über das Austragsorgan verlassen. Dies stellt jedoch nur eine Ausnahme dar. Beispiele für unzureichende Staubkuchenabreinigungen zeigt Bild 9. Der Staub Apyral 16 stellt ein typisches Beispiel für einen zur Redispergierung neigenden Staub dar, wie die Aufnahmen kurze Zeit nach der Filtermittelregenerierung zeigen (Bild 9 links). Hierbei sind die Bindungskräfte zwischen den Partikeln innerhalb des Staubkuchens nicht stark genug, um sich bei der Filtermittelregenerierung durch einen Druckluftstoß als kom-

pakte Struktur vom Filtermittel abzulösen. Als direkte Folge liegt ein Teil des abgereinigten Staubkuchens wieder als zu filtrierender Staub (Rohgas) vor. Als Beispiel für eine unvollständige Filtermittelregenerierung wird ein Staub aus der Aufbereitung von Papier, Pappe und Kartonnage (PPK) angeführt (Bild 9 rechts), bei dem nach der Abreinigung ein Teil des Staubkuchens auf der Filtermittelloberfläche zurückbleibt (*patchy cleaning*).

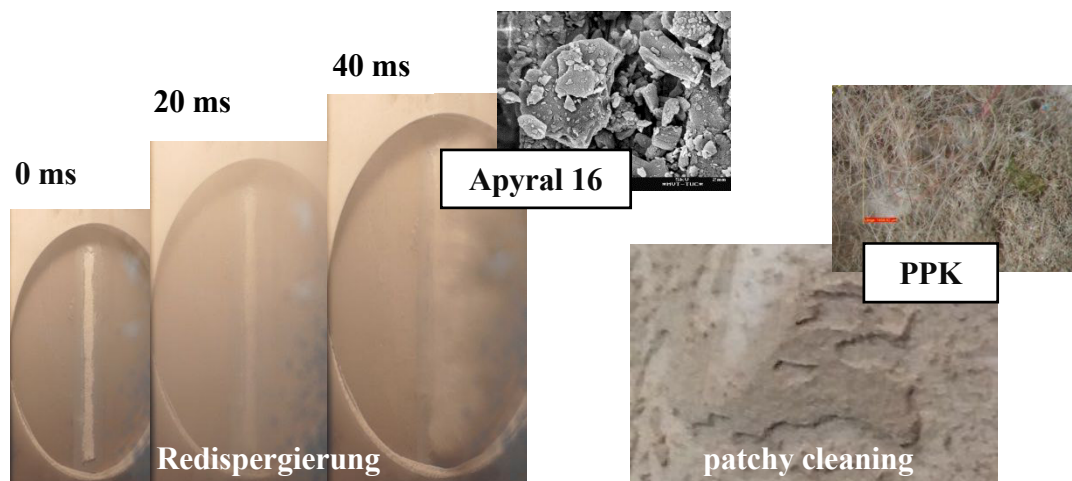


Bild 9: Erscheinungsformen unzureichender Staubkuchenabreinigung

Eine unvollständige Filtermittelregenerierung bewirkt stets instabile Prozessbedingungen sowie ein höheres Druckniveau zu Beginn des folgenden Filtrationszyklus. Dieser sich nach der Filtermittelregenerierung einstellende Restdruckverlust Δp_R unterscheidet sich infolge irreversibler Partikeleinlagerungen im (gealterten) Filtermittel vom Druckverlust des Filtermittels Δp_{FM} , was Bild 10 exemplarisch anhand von drei Filtrationszyklen Z1 - Z3 zeigt. Bei einem neuwertigen Filtermittel ist eine rasche Erhöhung des Restdruckverlusts zu beobachten. Anschließend nimmt der Restdruckverlust bei stabilen Prozessbedingungen einen nahezu konstanten Wert ein, der sich mit zunehmender Standzeit des Filtermittels nur noch geringfügig erhöht. Für einen wirtschaftlichen Betrieb des Filters sollte der Restdruckverlust langfristig einen möglichst geringen und stabilen Wert aufweisen. In Anbetracht steigender Energiekosten ist deshalb ein Austausch stark gealterter Filtermittel mit hohen Restdruckverlusten erforderlich. Nach [19 pp. 49–50] fördern hohe Regenerierungsintensitäten und –häufigkeiten die Filtermittellagerung. Auch die Gefahr der Kanalbildung im Staubkuchen steigt damit bei der Regenerierung, wodurch nur ein Teil des Filtermittels abgereinigt wird. Intensität und Häufigkeit der Filtermittelregenerierung sollten aus diesen Gründen auf ein möglichst geringes, technologisch vertretbares, Niveau reduziert werden.

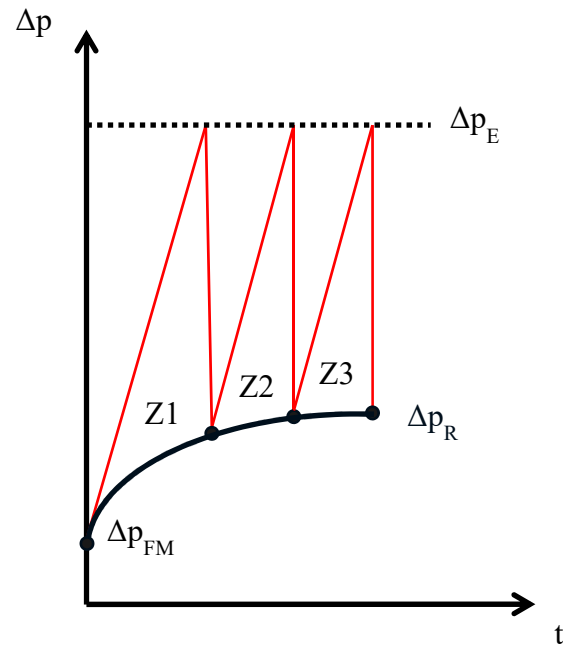


Bild 10: Differenzdruckverlauf Oberflächenfiltration (differenzdruckgesteuerte Regenerierung bei Δp_E)

Infolge der Filtermittelregenerierung treten verstärkt Staubemissionen auf, wie ein charakteristischer Verlauf des Emissionsverhaltens eines Oberflächenfilters anhand mehrerer Filtrationszyklen exemplarisch zeigt (Bild 11). Da Entstaubungsanlagen primär der zuverlässigen Staubbabscheidung dienen, sollte die Anzahl der Filtermittelregenerierungen und damit auch der Staubemissionen auch aus diesem Grund auf ein Minimum reduziert werden [19 pp. 39–41]. Hierbei ist ein prozesstechnisches und ökonomisches Optimum als Kompromiss zwischen Staubemissionen, Druckluft- und Stromkosten zu finden. Gesetzlich vorgegebene Emissionsgrenzwerte müssen dabei zum Schutz von Mensch, Umwelt und Technik jederzeit sicher eingehalten werden. Ein emissionsfreier Betrieb von Filtern ist technisch nicht möglich.

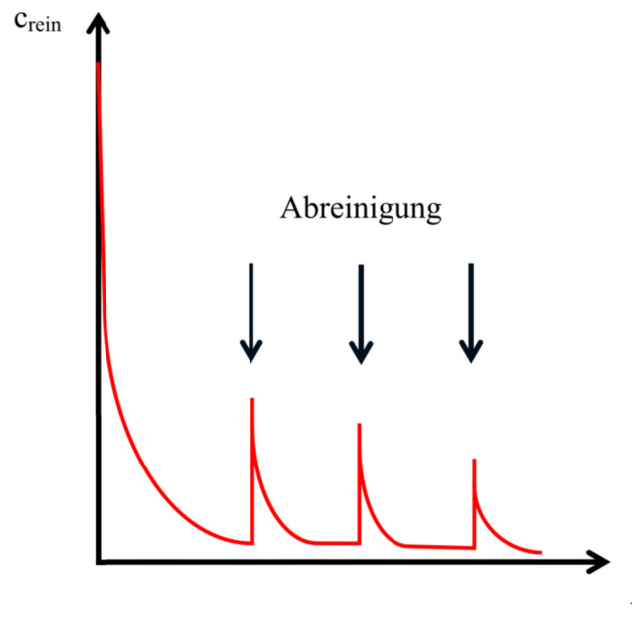


Bild 11: Charakteristischer Verlauf der Staubemissionen eines Oberflächenfilters

Zu Beginn der Filtration weist ein neuwertiges Filtermittel verhältnismäßig hohe Staubkonzentrationen auf der Reingasseite c_{rein} auf. Dies trifft sowohl auf die Filtrationsphase als auch auf den Zeitpunkt direkt nach der Filtermittelregenerierung zu, da Partikel nicht ausschließlich durch das Filtermittel selbst abgeschieden werden. Durch in das Filtermittel eingelagerte Partikel bilden sich ausgehend von den Fasern des Filtermittels Dendritenstrukturen aus, welche den Abscheidegrad des Filtermittels verbessern [31, 29 pp. 156–160, 19 pp. 39–41]. Somit verfügt das Filtermittel erst nach dieser sog. Konditionierungsphase hinsichtlich des Abscheidegrades über seine von den Prozessbedingungen abhängige, volle Leistungsfähigkeit.

Als Grund für die nach der Regenerierung erhöhten Staubemissionen ist der direkte Partikel-durchtritt auf die Reingasseite zu nennen, der durch die frisch abgereinigte Filtermitteloberfläche kurzzeitig ermöglicht wird, bevor sich erneut ein Staubkuchen ausbildet. Das Zurückschlagen des Filtermittels auf den Stützkorb, auch als *Teppichklopfer-effekt* bezeichnet, begünstigt diesen Vorgang. In der Literatur finden sich vereinzelt auch Hinweise auf eine sukzessive Wanderung der Partikel durch das Filtermittel. Dieser Effekt wird auch *seepage* genannt. Die Staubemissionen des Filters steigen mit zunehmender Regenerierungsintensität sowie Filteranströmgeschwindigkeit tendenziell an. Auch Fehlstellen im Filtermedium (*pinholes*) können für Partikelemissionen verantwortlich sein [29 pp. 156–160, 32]. Gleiches gilt für Beschädigungen des Filtermittels z. B. durch Produktionsfehler oder beim Einbau.

2.5 Abstimmung des Filtermittels auf die Anwendung

Der Aufbau und die Betriebsweise eines effizienten Oberflächenfilters sind auf die konkrete Anwendung und das Einsatzgebiet abzustimmen. Primär betrifft dies die Auswahl eines geeigneten Filtermediums in Abhängigkeit der Staubeigenschaften. Diese werden maßgeblich durch das Agglomerationsverhalten der Stäube beeinflusst, welches sich auf deren Partikelgrößenverteilung und damit auch Abscheideverhalten auswirkt. Weitere Auswirkungen des Agglomerationsverhaltens bestehen für den Aufbau des Staubkuchens und dessen Abreinigung. Für die Werkstoffauswahl des Filtermittels sind die Temperatur und das chemische Milieu des Fluids entscheidend, wozu unterschiedliche Kunststoffe zur Verfügung stehen.

2.5.1 Granulometrische Eigenschaften

Im Kontext der vorliegenden Arbeit wird Staub als Summe fein verteilter Feststoffpartikel (disperse Phase) in einer gasförmigen Umgebung (fluide Phase) angesehen, die das Rohgas bilden. Zur Beschreibung der granulometrischen Eigenschaften ausgewählter Stäube, die auch im Rahmen eigener experimenteller Untersuchungen verwendet werden, findet eine Analyse der Partikelgrößenverteilung und der Partikelform statt. Bild 12 und Anhang 1 zeigen zunächst die Partikelgrößenverteilung. Zur Messung der unterschiedlichen Stäube unter vergleichbaren Bedingungen wurden Partikelgrößen unter $4,5\ \mu\text{m}$ nicht berücksichtigt.

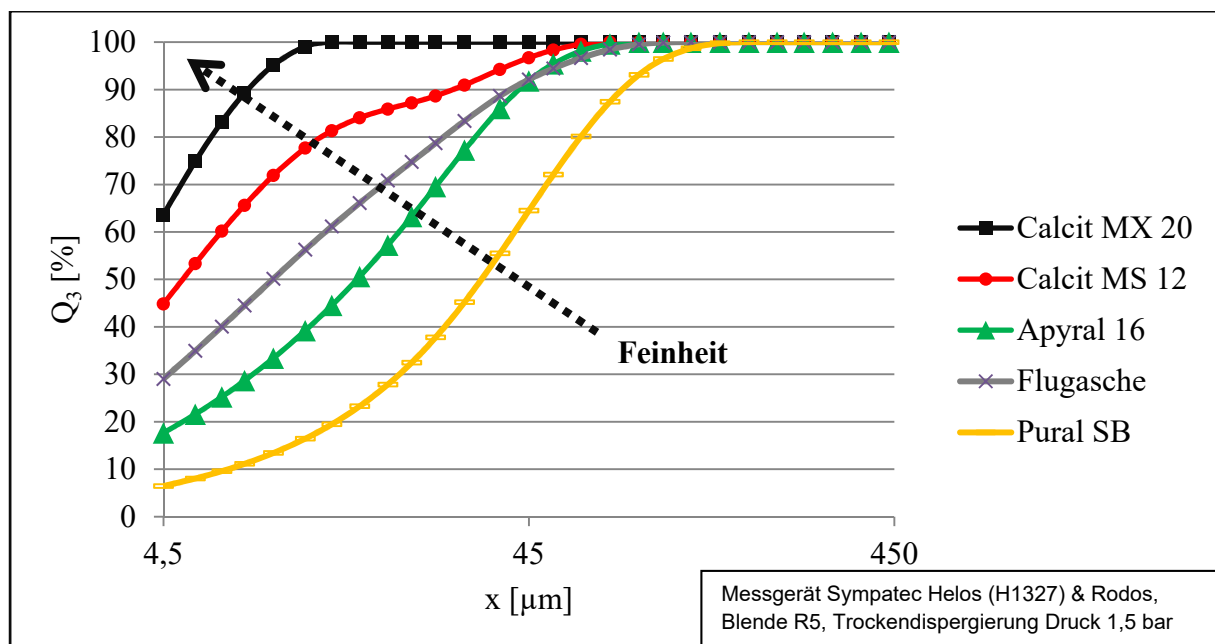


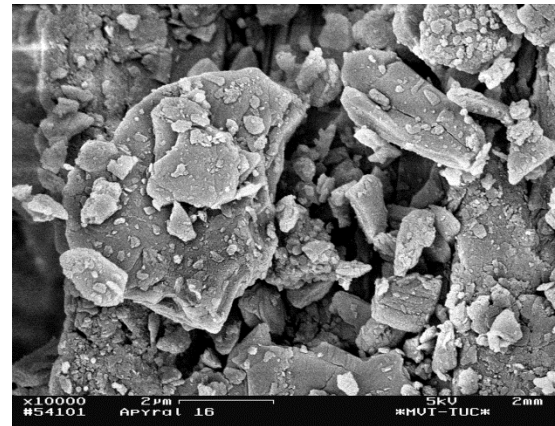
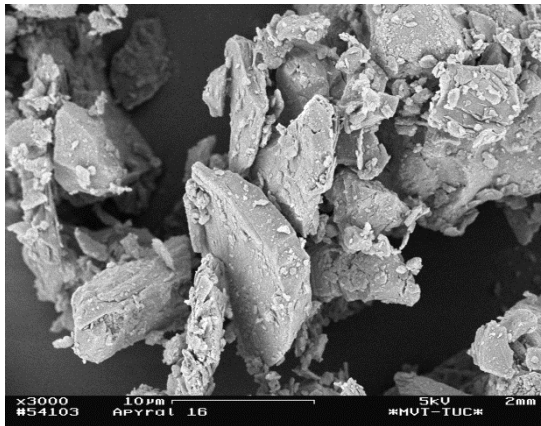
Bild 12: Partikelgrößenverteilungen ausgewählter Stäube

Bild 12 zeigt, dass die untersuchten Stäube erhebliche Unterschiede aufweisen, was anhand des Medianwertes veranschaulicht wird. Die Kalksteinmehle (Produktdatenblätter siehe Anhänge 2a-2b) zeigen die feinsten Partikelgrößenverteilungen mit Medianwerten von ca. 3,6 μm (*Calcit MX20*) sowie ca. 5,1 μm (*Calcit MS12*). Die Stäube *Flugasche* (Medianwert ca. 9,0 μm) und *Apyral 16* (Medianwert 15,3 μm , Produktdatenblatt siehe Anhang 2c) folgen mit erheblich größeren Verteilungen. Größter gemessener Staub war *Pural SB* (Medianwert 33,5 μm , Produktdatenblatt siehe Anhang 2d). Mit zunehmender Feinheit des Staubs (Verschiebung der Partikelgrößenverteilung hin zu kleineren Medianwerten) wird deren Abscheidung aufgrund der wirkenden Mechanismen tendenziell erschwert. Die Partikelgrößenverteilung kann jedoch nicht losgelöst vom Agglomerationsverhalten betrachtet werden. Feine Stäube neigen stärker zur Agglomeration, was die wirksame Partikelgröße erhöhen kann und damit die Filtrierbarkeit wieder erleichtert. Der unter Laborbedingungen gemessene Dispersitätszustand der Stäube kann sich damit maßgeblich von praktischen Verhältnissen unterscheiden.

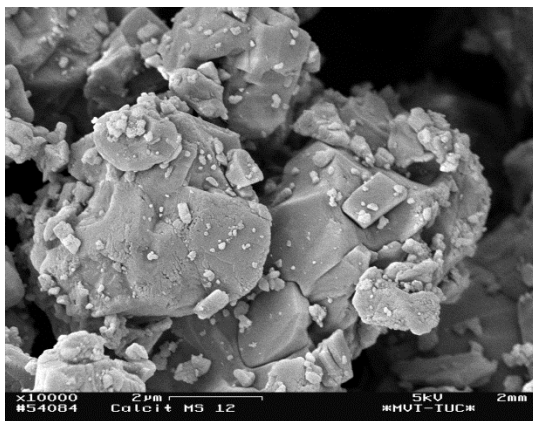
Aufschluss zur Partikelform von Stäuben liefern rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (Bild 13). Feine Stäube mit sphärischer Partikelform dringen bevorzugt in das Filtermittel ein und begünstigen damit den Prozess der Filtermittelalterung. Aus diesem Grund bieten Filtermedien Vorteile, bei denen die Anfiltration des Staubs bevorzugt an der Oberfläche erfolgt. Die Aufnahmen zeigen vorwiegend plättchenförmige Partikel bei den Stäuben *Apyral 16*, *Calcit MX20* und *Calcit MS12*. Oberflächlich verhältnismäßig glatte, sphärische Partikel sind bei dem Staub *Pural SB* zu beobachten. Derartige Partikel enthält auch die *Flugasche*; darüber hinaus sind vereinzelt Hohlkugeln und andere Partikelformen zu beobachten.

2.5.2 Einfluss des Agglomerationsverhaltens und dessen Beurteilung

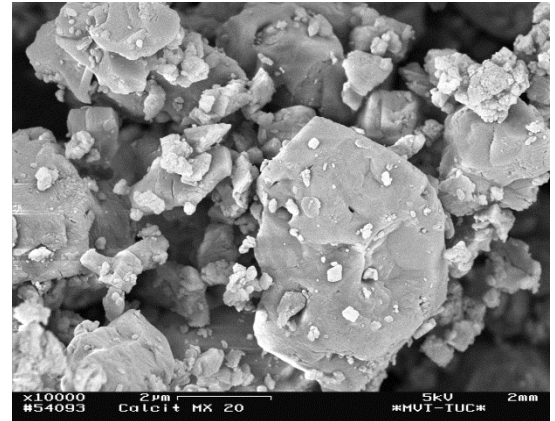
Der komplexe Einfluss der Elektrostatik auf die Oberflächenfiltration wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit kurz erläutert. Es erfolgt ein Verweis auf einschlägige Fachliteratur [33]. Prinzipiell bewirken bipolare Aufladungen eine Anziehung (Koagulation); unipolare Aufladungen eine Abstoßung der Partikel untereinander. Je nach Partikelsystem kann eine erhebliche Beeinflussung durch elektrostatische Effekte erfolgen. Eine gezielte Beeinflussung (u.a. elektrostatische Dispersion bei unipolaren Partikelladungen) besitzt z.B. bei Synthese- und Beschichtungsprozessen erhebliche technische Bedeutung [34]. Durch Einstellung des Dispersitätszustands hinsichtlich Partikel- und Agglomeratgröße ist damit eine gezielte Einstellung von Produkteigenschaften möglich.



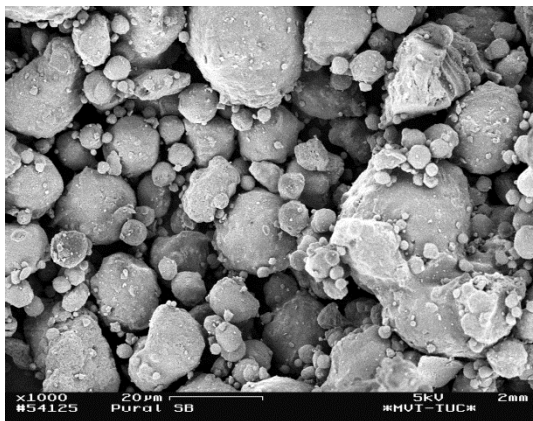
Apyral 16



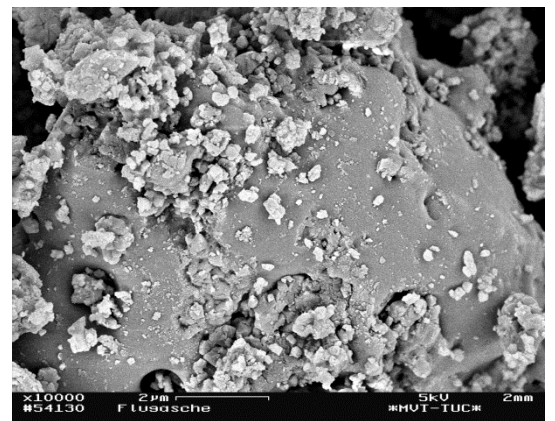
Calcit MS 12



Calcit MX 20



Pural SB



Flugasche

Bild 13: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen ausgewählter Stäube

Untersuchungen mit submikroner pyrogener Kieselsäure und Membranfiltermedien nach [35] zeigen kein signifikantes, elektrisch induziertes Agglomeratwachstum. Insgesamt wurde kein verbessertes Betriebsverhalten von Oberflächenfiltern durch gezielte elektrostatische Aufladungen festgestellt. Ein positiver Einfluss elektrostatischer Aufladungen auf die Regenerierbarkeit zeigte sich im Rahmen dieser Untersuchungen ausschließlich bei positiv geladenen Aerosolen.

Der erhebliche Einfluss der Elektrostatik auf die Oberflächenfiltration ist als Konsequenz daraus stets zu berücksichtigen. Für alle praktischen Untersuchungen sind aus diesem Grund vergleichbare elektrostatische Aufladungen anzustreben. Die Gefahr von Fehlinterpretationen aufgrund dieses Einflusses wird damit erheblich gesenkt.

Empirisch gewonnene Erfahrungswerte sollten, insofern verfügbar, zur Beurteilung des Agglomerationsverhaltens herangezogen werden. Demnach sind die verhältnismäßig feinen Kalksteinmehle, bestehend aus kristallinem, natürlichen Calciumcarbonat ($> 99\%$), als gut agglomerierende, einfach zu filtrierende Stäube bekannt. Im Gegensatz dazu ist der gröbste Staub *Pural SB* (74 % Aluminiumoxid) ein Musterbeispiel für einen gut fließfähigen, schlecht agglomerierenden und damit schlecht zu filtrierenden Staub. *Apyral 16* (Aluminiumhydroxidgehalt $> 99\%$) und *Flugasche* (vorwiegend Quarz, Aluminiumsilikat, Schwermetalle) stellten sich auf Grundlage eigener Untersuchungen ebenfalls als anspruchsvolle Filtrationsaufgabe heraus.

Die Beurteilung des Agglomerationsverhaltens ist über die Indikatoren Fließfähigkeit und Staubungsverhalten zu empfehlen. Dabei handelt es sich um Schüttguteigenschaften, die mit standardisierten Methoden bestimmt werden können. Wesentliche Staubeigenschaften mit Einfluss auf das Filtrationsverhalten können damit in einem Parameter zusammengefasst werden. Sowohl die Fließfähigkeit als auch das Staubungsverhalten nehmen mit zunehmender Agglomerationsneigung ab.

Die Fließfähigkeit kann mit dem Verfahren nach IMSE [36] i. V. m. [37] bestimmt werden, welches auf mineralische Schüttgüter angewandt werden kann. Diese werden dabei in einem Trichter über einem Sieb so positioniert, dass das Schüttgut nach Anheben des Trichters auf das Sieb ausfließen kann. Der Anteil durch das Sieb laufenden Materials wird in Form eines Fließwertes als Indikation für das Fließverhalten des Schüttgutes angewandt. Ebenfalls zur Beurteilung der Fließfähigkeit feiner Schüttgüter geeignet ist das Verfahren nach FISCHER [38]. Dabei kommt eine geneigte Rinne mit einem von unten nach oben luftdurchströmten Boden zum Einsatz. Das Schüttgut wird somit nach Aufgabe fluidisiert und legt eine definierte Strecke zurück, die als Maß für die Fluidisierbarkeit dient. Je nach Materialeigenschaften können die Neigung der Fließrinne und der Luftstrom zur Fluidisierung variiert werden. Nach [19 pp. 246–252] wurde der Versuch unternommen, die Fließfähigkeit über den einfacher bestimmbarer Parameter der Schüttdichte abzuschätzen. Eigene orientierende Untersuchungen zeigen jedoch, dass kein schlüssiger Zusammenhang zwischen Schüttdichte und Fließfähigkeit existiert. Dies wird durch den Fließindex nach Carr [39] bestätigt, der wesentlich umfassender betrachtet wird. Das zur

Beurteilung angesetzte Schema erfordert neben der Schüttdichte Informationen zum Böschungs- und Spatelwinkel, Kompressibilitätskoeffizient, Klopfdichte sowie zur Kohäsion nach Carr. Im Feinkornbereich wird eine sprunghafte Reduzierung der Fließfähigkeit festgestellt.

Die Staubungsneigung von Schüttgütern wirkt sich auf die Arbeits- und Produktsicherheit aus und kann mit standardisierten Methoden bestimmt werden. Bei Verwendung einer Freifallapparatur fällt der zu untersuchende Staub aus einer definierten Höhe in eine Kammer, wodurch er aufgewirbelt wird. Die Sedimentation der Staubpartikel wird in Abhängigkeit der Zeit über eine Extinktionsmessung verfolgt. Ein langsamer Rückgang der Staubkonzentration in der Kammer weist auf eine hohe Staubungsneigung hin. Durch [40] wurde mit einer derartigen Freifallapparatur der Einfluss des Luftdrucks auf die Staubungsneigung untersucht. Diese ist bei evakuierter Kammer stets geringer, was mit der höheren Sedimentationsgeschwindigkeit der Partikel bei geringerer Fluidviskosität begründet wird. Die Prozesstemperaturen können sich somit ebenfalls erheblich auf die Staubungsneigung auswirken. Die Staubungsneigung abgelagerter Stäube ist Inhalt von Untersuchungen im Rahmen von [41]. Zum Einsatz kommt dabei ein Versuchsaufbau, bei dem eine am Boden liegende Staubschicht mit einem Ventilator aufgewirbelt wird. Der dadurch bedingte Anstieg der Staubkonzentration über der abgelagerten Staubschicht wird gemessen. Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass mit zunehmender Zeit nach abgeschaltetem Ventilator die Höhe der Staubschicht am Boden infolge der Partikelsedimentation ansteigt. Kalkstein (Ulmer Weiss XMF) weist dabei eine deutlich schnellere Sedimentation auf als der Staub Pural NF. Neben den Staubeigenschaften ist zur Beurteilung der Staubungsneigung die Art der mechanischen Beanspruchung entscheidend. Nach [42] kann dies zu deutlichen Unterschieden hinsichtlich Staubungsneigung auf Grundlage unterschiedlicher Dispersitätszustände der Stäube führen.

Zur Quantifizierung der Staubungsneigung von Pulvern können neben experimentellen Untersuchungen auch rechnergestützte Simulationen eingesetzt werden. Ziele des Experiments nach [43] waren die Untersuchung der Staubungsneigung unterschiedlicher Stäube sowie der Vergleich gemessener und simulativ berechneter Partikelgrößenverteilungen redispergierter Stäube. Die mechanische Beanspruchung erfolgte mit Hilfe einer singularär angeregten Grundplatte (Versuchsaufbau „Shaker“). Der gut agglomerierende Kalkstein (Ulmer Weiss XMF) zeigte dabei im Vergleich zum faserhaltigen Teststaub KSL 11047-B nahezu keine Staubungsneigung. Hinsichtlich des Vergleichs zwischen Simulation und Experiment ergab sich eine gute Übereinstimmung.

2.5.3 Filtermittelauswahl

Der Wahl des Filtermittels kommt eine entscheidende Bedeutung zu, da dieses neben der zuverlässigen Abscheidung der Stäube den mechanischen, chemischen und thermischen Beanspruchungen des jeweiligen Filtrationsprozesses möglichst langfristig standhalten muss. Dazu steht eine große Auswahl in ihren Eigenschaften gut beschriebener, hauptsächlich synthetischer Fasern zur Verfügung. Damit können vielfältigste Anwendungen erschlossen werden. Limitiert wird der Einsatz von Oberflächenfiltern vorwiegend durch die Temperaturbeständigkeit der Fasern. Weit verbreitete Filtermitteltypen sind Nadelfilz- und Membranfiltermedien. Ein Standard-Nadelfilz im Neuzustand (Bild 14 oben links) stellt ein Vlies aus Fasern mit einem Durchmesser im Mikrometerbereich dar, welches durch Einstechen mit Nadeln dreidimensional verfestigt wird. Durch eine Thermofixierung (Bild 14 oben rechts) oder das Einarbeiten eines Stützgewebes kann das Filtermittel zusätzlich stabilisiert werden. Dessen Struktur sollte so dicht sein, dass die Partikel möglichst auf der Oberfläche des Nadelfilzes abgeschieden werden. Ein Eindringen des Staubes in tiefere Schichten ist dennoch möglich (Bild 14 Mitte). Diese überwiegend irreversiblen Partikeleinlagerungen führen zu einem ansteigenden Druckverlust des Filtermittels und damit zu dessen Alterung, verbessern jedoch auch die Abscheideleistung des Filtermittels. Nadelfilzfiltermedien besitzen einen hohen Weltmarktanteil von ca. 80 % [44]. Membranfiltermedien (Neuzustand Bild 14 unten) bestehen üblicherweise aus einem Nadelfilz und sind mit einer Membran ausgerüstet. Während der Nadelfilz bei einem Membranfiltermedium ausschließlich der mechanischen Stabilität des Filtermittels dient, übernimmt eine dünne Kunststoffmembran die eigentliche Filtrationsaufgabe. Wesentliche Vorteile gegenüber Nadelfilzen sind ein deutlich verbesserter Abscheidegrad, geringere Partikeleinlagerungen im Filtermittel und eine glatte, verhältnismäßig leicht zu regenerierende, Oberfläche. Dies ist bei stark haftenden (klebrigen) Staubkuchen vorteilhaft. Nachteilig sind die hohe mechanische Empfindlichkeit der Membran sowie der gegenüber Nadelfilzen erhöhte Druckverlust. Eine funktionale PTFE-Membran (Polytetrafluorethylen) besitzt gegenüber Chemikalien eine exzellente Beständigkeit [44]. In Abhängigkeit der Prozessbedingungen ist eine Dauertemperaturbelastbarkeit von bis zu 250 °C möglich.

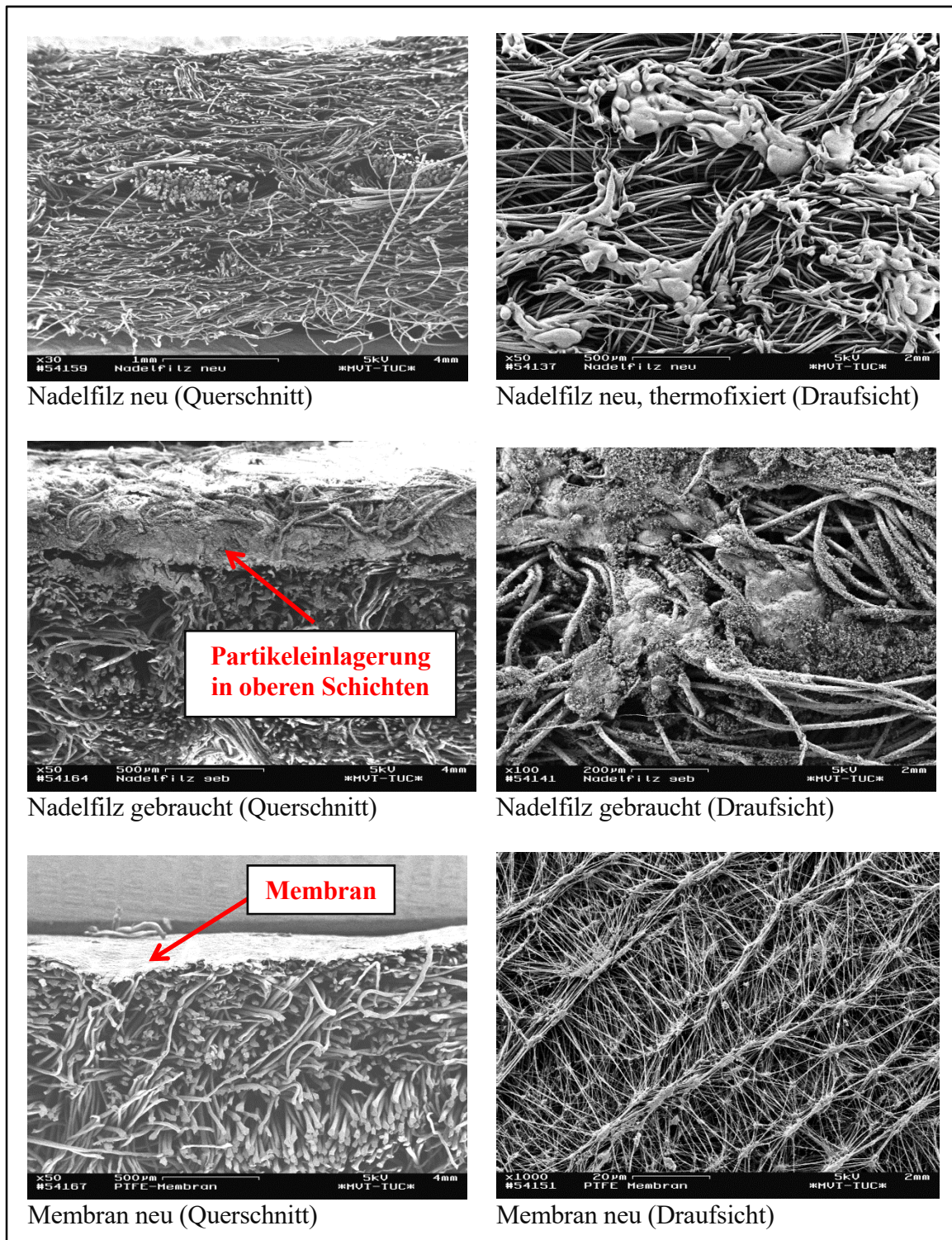


Bild 14: Elektronenmikroskopische Aufnahmen ausgewählter Filtermedien

Während Nadelfilze und deren Ausrüstung mit Membran bereits etabliert sind, werden weitere Ausrüstungen entwickelt, deren Marktanteil noch verhältnismäßig gering ist. Konventionelle Nadelfilze werden dabei mit z. T. deutlich feineren Fasern (z. B. Mikro- oder Nanofasern) ausgestattet, deren Potenzial speziell zur Abscheidung von Feinstäuben aufgrund der größeren Auf-

treffwahrscheinlichkeit von Partikeln auf eine Faser deutlich erhöht ist. Weitere Ausstattungen von Filtermedien sind nach [28 p. 22] Imprägnierungen, wodurch die chemische Beständigkeit der Filtermittel oder weitere Eigenschaften (hydrophob/hydrophil, Entflammbarkeit) gezielt manipuliert werden können. Die Ableitung elektrostatischer Ladungen ist wesentlich für den Brand- und Explosionsschutz und kann durch Einarbeiten leitfähiger Metallfasern (*Elektretfasern*) erfolgen. Die für Anwendungen zur Oberflächenfiltration überwiegend eingesetzten flexiblen Filtermittel werden nach Herstellung von Flächenware zu den benötigten Filterelementen konfektioniert. Datenblätter liefern standardisierte Herstellerinformationen über die Eigenschaften der Filtermittel. Im Zuge fortschreitender Entwicklungen auf diesem Gebiet existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Filtermittel. Neben der Faser als wesentliches Element ist oft die Ausrüstung der Filtermedien von entscheidender Bedeutung für das Staubabscheideverhalten.

Die Möglichkeiten zur Reduzierung der Feinstaubemissionen industrieller Schlauchfilteranlagen sind Bestandteil umfangreicher Untersuchungen im Technikumsmaßstab sowie unter praktischen Bedingungen [45]. Dabei kam der schlecht agglomerierenden Staub Pural SB zum Einsatz. Es wird bestätigt, dass die Alterung des Filtermittels infolge irreversibler Partikeleinlagerungen Feinstaubemissionen verringert. Speziell mit Membran- oder Meltblownauflage ausgestattete Filtermedien bieten hierbei entscheidende Vorteile. In diesem Zusammenhang wird deutlich, dass sich bei der Oberflächenfiltration ökologische und ökonomische Ziele durchaus konträr zueinander gestalten. Geringe Staubemissionen sind in diesem Fall mit erhöhten energetischen Aufwendungen verbunden und umgekehrt.

2.6 Bilanzierung von Entstaubungsprozessen

Die Leistungsfähigkeit von Entstaubungsprozessen kann anhand von Leistungskennzahlen objektiv beurteilt werden. Zur Ermittlung dieser Kennzahlen ist eine Bilanzierung der Volumen- und Masseströme entsprechend Bild 15 erforderlich. Dabei steht \dot{m} für den Massestrom, \dot{V} für den Volumenstrom, c für die Staubkonzentration und $q(x)$ für die Partikelgrößenverteilung der Stäube. Für das Rohgas (roh), das Reingas (rein) und den Staubaustrag (G) werden entsprechende Indizes ergänzt.

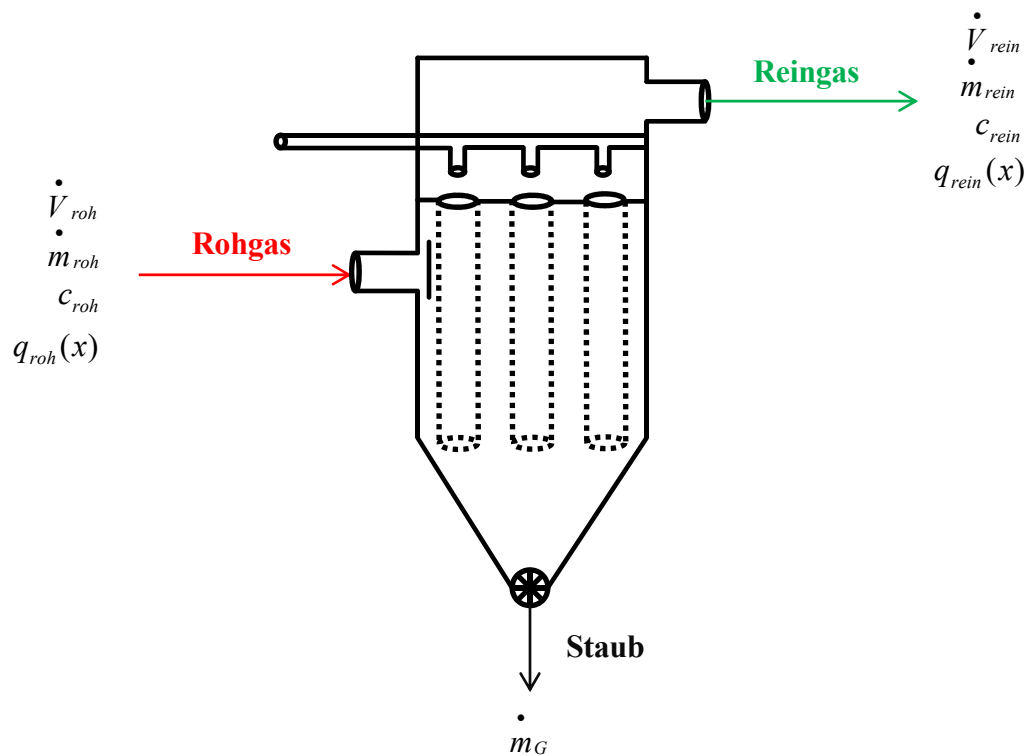


Bild 15: Bilanzierung der Oberflächenfiltration

Gegenüber der klassischen Bilanzierung von Klassierprozessen können für die Oberflächenfiltration verschiedene Vereinfachungen getroffen werden.

- Vernachlässigung des Fluids bei Massestrombilanzierung,
- Vernachlässigung der disperse Phase (Staub) bei Volumenstrombilanzierung,
- im Grobgut exklusive Betrachtung des Staubmassenstroms.

Zusätzlich zur Volumen- und Massestrombilanzierung ist die Bilanzierung der Energieverbräuche erforderlich. Nachfolgend werden aus diesen unterschiedlichen bilanzierten Aspekten entscheidende Leistungskennzahlen für Oberflächenfiltrationsprozesse abgeleitet.

2.6.1 Volumenstrombilanzierung

Die Größe eines Oberflächenfilters und des dazu benötigten Ventilators richtet sich maßgeblich nach dem zu entstaubenden Rohgasvolumenstrom. Bei vielen Anwendungen liegt als Fluid Luft vor. Je nach klimatischen Bedingungen unterscheiden sich die Volumenströme unter Betriebs-

bedingungen z. T. erheblich von denen unter Normalbedingungen. Die klimatischen Rahmenbedingungen beeinflussen damit direkt u. a. die Filterflächenbelastung sowie die Roh- und Reingasstaubkonzentrationen. Für die Auslegung von Oberflächenfiltern sowie für vergleichende Untersuchungen ist deshalb eine Normierung der Volumenströme unter Berücksichtigung von Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit nach Formel (20) in Anlehnung an [46 p. 106] erforderlich. Der Volumenstrom unter Normalbedingungen (\dot{V}_N) wird dabei aus dem Volumenstrom unter Betriebsbedingungen (\dot{V}_B) abgeleitet. In die Gleichung gehen die Temperaturen unter Normal- (T_N) und Betriebsbedingungen (T_B) ein. Weiterhin ist die Kenntnis des Drucks der atmosphärischen Umgebung (p_{at}), des Normaldrucks (p_N), des statischen Drucks im System (p_{st}) sowie des Wasserdampfpartialdrucks p_{H_2O} notwendig.

$$\dot{V}_N = \dot{V}_B \cdot \frac{T_N \cdot (p_{at} + p_{st} - p_{H_2O})}{p_N \cdot T_B} \quad (20)$$

Der Rohgasvolumenstrom \dot{V}_{roh} entspricht im Filtrationsbetrieb annähernd dem Reingasvolumenstrom \dot{V}_{rein} . Durch die Filtermittelregenerierung per Druckluftstoß wird dieses Gleichgewicht kurzfristig gestört, da entsprechend Formel (21) ein zusätzlicher Volumenstrom \dot{V}_{Reg} in das System gelangt. Instabile Prozessbedingungen mit häufiger Regenerierung oder Druckluftleckagen sind demnach zu vermeiden.

$$\dot{V}_{rein} = \dot{V}_{roh} + \dot{V}_{Reg} \quad (21)$$

2.6.2 Massestrombilanzierung

Die zuverlässige Staubabscheidung als primäre Aufgabe eines Oberflächenfilters kann auf Grundlage der Bilanzierung der Masseströme beurteilt werden. Die Staubfracht des Rohgases \dot{m}_{roh} wird dabei durch die Filtration weitestgehend abgeschieden (\dot{m}_G). Nur ein geringer Anteil (\dot{m}_{rein}) passiert nach Formel (22) das Filtermittel.

$$\dot{m}_{roh} = \dot{m}_{rein} + \dot{m}_G \quad (22)$$

Aus dem Verhältnis der Staubfracht des Reingases \dot{m}_{rein} und dem Reingasvolumenstrom \dot{V}_{rein} kann entsprechend Formel (23) die Leistungskennzahl *Reingasstaubkonzentration* c_{rein} abgeleitet werden. Dieser Parameter zeigt an, ob geltende Emissionsgrenzwerte eingehalten werden.

$$c_{rein} = \frac{\dot{m}_{rein}}{\dot{V}_{rein}} \quad (23)$$

Der Abscheidegrad eines Oberflächenfiltrationsprozesses ist abhängig von der Partikelgröße (siehe Kapitel 2.2). Dementsprechend lässt sich eine Trennfunktion (*Fraktionsabscheidegrad*) darstellen. Formel (24) [29 p. 191] zeigt den partikelgrößenabhängigen Fraktionsabscheidegrad $T(x)$, der sich aus den dazugehörigen Roh- und Reingasstaubkonzentrationen $c_{roh}(x)$ und $c_{rein}(x)$ berechnet. Der Fraktionsabscheidegrad stellt eine weitere Leistungskennzahl dar.

$$T(x) = 1 - \frac{c_{rein}(x)}{c_{roh}(x)} \quad (24)$$

Der *Gesamtabscheidegrad* E berechnet sich aus der Partikelgrößenverteilung des Rohgases $q_{roh}(x)$ und dem Fraktionsabscheidegrad aller Partikelklassen $T(x)$ zwischen x_{min} und x_{max} nach Formel (25) [29 p. 191]. Dieser muss je nach verwendeter Mengeneinheit (z. B. Anzahl, Masse) individuell beurteilt werden.

$$E = \int_{x_{min}}^{x_{max}} T(x) \cdot q_{roh}(x) dx \quad (25)$$

2.6.3 Energetische Bilanzierung

Die energetische Bilanzierung von Oberflächenfiltrationsprozessen führt in Anbetracht der wesentlichen Energieträger Strom und Druckluft zu den Leistungskennzahlen *Stromverbrauch* und *Druckluftverbrauch*. Der Stromverbrauch kann über die Leistungsaufnahme des Lüfters sowie weiterer elektrisch angetriebener Komponenten quantifiziert werden. Die zur Regenerierung der Filtermittel benötigte Druckluftmenge kann durch Verbrauchsmessungen ermittelt werden, um den spezifischen Druckluftbedarf je Druckluftstoß zu ermitteln.

3 Charakterisierung und Bilanzierung zirkulierender Staubanteile

Zirkulierende Staubanteile stellen unerwünschte Wechselwirkungen abgereinigten Staubs mit der Filtermittelloberfläche dar [u. a. 20 p. 252, 19 p. 223, 29 p. 180], die nach Stand der Technik nicht vermeidbar sind. Anstatt nach der Regenerierung des Filtermittels direkt aus dem Prozessraum ausgetragen zu werden, findet eine ein- oder mehrfache Wiederanlagerung an den Filterelementen statt. Der dadurch verursachte Druckverlust verschlechtert die Energieeffizienz des Oberflächenfiltrationsprozesses. Weiterhin wird bei differenzdruckgesteuerter Betriebsweise der Enddruckverlust vorzeitig erreicht, der den Druckluftstoß zur Filtermittelregenerierung auslöst. Die Notwendigkeit zur häufigeren Abreinigung des Staubkuchens führt zu höheren (Fein)staubemissionen, da diese bevorzugt infolge der Filtermittelregenerierung auftreten. Eine Reduzierung zirkulierender Staubanteile ermöglicht somit eine erhebliche Effizienzsteigerung von Oberflächenfiltern mit Erhöhung der Energieeffizienz und Reduzierung von Staubemissionen. Dieses Potenzial konnte bisher nicht genutzt werden, da sowohl Prozessverständnis als auch eine objektive Datengrundlage zu den Auswirkungen dieses Effektes fehlen.

Durch das vorliegende Kapitel wird ein Teil dieser Lücke als Voraussetzung für einen effizienten Betrieb von Oberflächenfiltern geschlossen. Zunächst wird dazu ein Überblick zu den bekannten negativen Auswirkungen zirkulierender Staubanteile auf die Oberflächenfiltration gegeben (Kapitel 3.1). Daraus werden wesentliche Einflussgrößen auf zirkulierende Staubanteile abgeleitet (Kapitel 3.2). Deren Bewegungsmuster im Rohgasraum des Filters und Wechselwirkungen mit den Filterelementen (Dynamik) werden in Kapitel 3.3 diskutiert. Auf Basis eigener konzeptioneller Arbeiten, gestützt durch experimentelle Untersuchungen, wird eine Methodik zur energetischen Quantifizierung (Kapitel 3.4) vorgestellt, welche die Bilanzierung zirkulierender Staubanteile ermöglicht (Kapitel 3.5). Anknüpfungspunkte für weiterführende Untersuchungen werden abschließend aufgezeigt (Kapitel 3.6).

3.1 Stand der Technik

Zirkulierende Staubanteile treten bei der Regenerierung von Oberflächenfiltration auf. Das Prinzip zirkulierender Staubanteile ist in Bild 16 dargestellt. Infolge der Filtermittelregenerierung per Druckluftstoß wird die Strömungsrichtung bei der on-line-Regenerierung kurzzeitig

umgekehrt. Danach wirkt durch das Druckgefälle zwischen Roh- und Reingasseite wieder die Kraftkomponente, die den Partikeltransport zur Filtermittelloberfläche hervorruft. Im Rohgasraum befindliche feine Staubanteile können somit wieder anfiltriert werden. Auch Teile des abgereinigten Staubkuchens können sich infolge des Druckluftstoßes direkt auf benachbarten Filterelementen ablagern, wobei dieser Effekt auch bei off-line-Regenerierung zum Tragen kommt. Zirkulierende Staubanteile werden im Rahmen der Arbeit entsprechend ihrer Wechselwirkung mit dem regenerierten (ZSA_A) oder mit benachbarten Filterelementen (ZSA_B) differenziert (Bild 16). Mögliche Bewegungsmuster zirkulierender Stäube sind exemplarisch eingezeichnet und können bei Oberflächenfiltern mit mehreren Filterelementen alternierend sein (schwarze Pfeile).

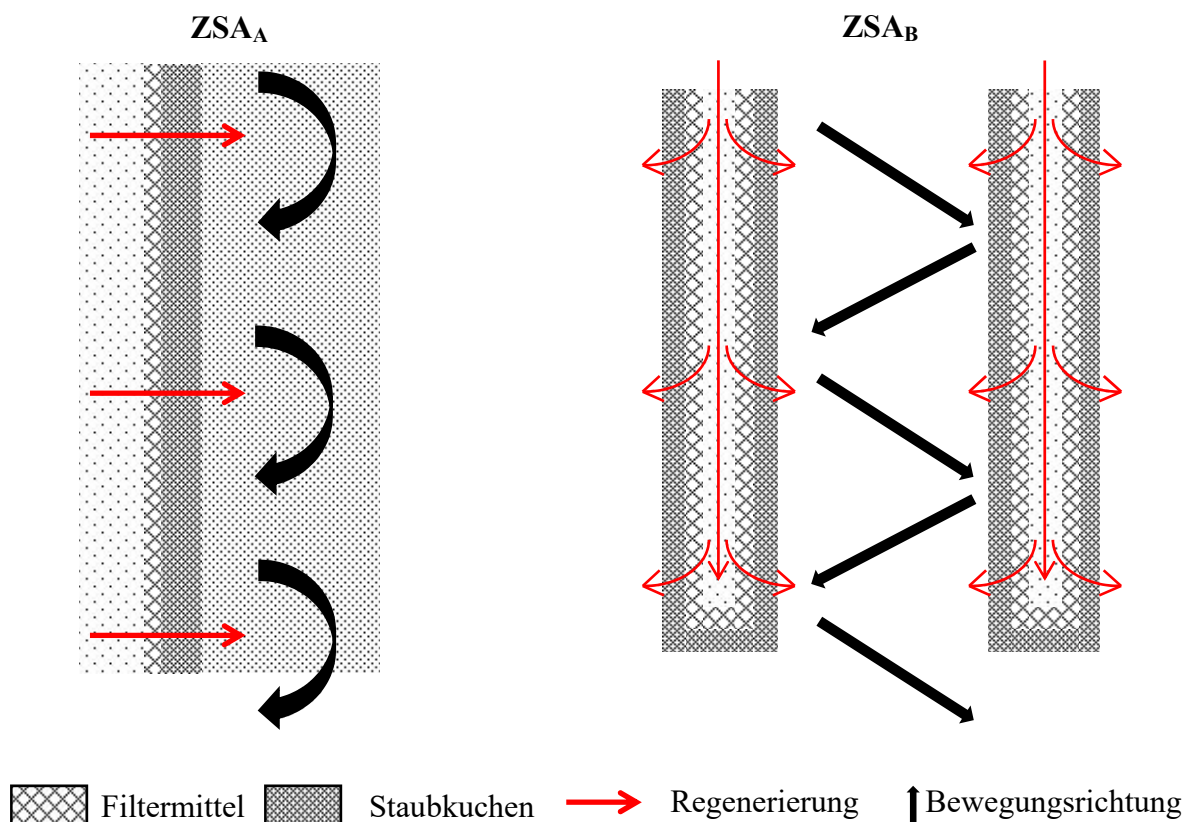


Bild 16: Differenzierung zirkulierender Staubanteile

Bereits frühe Untersuchungen zeigten, dass zirkulierende Staubanteile Entstaubungsprozesse zum Erliegen bringen können [19 p. 47]. Dies ergab der Vergleich der Staubflächenmassen vor und nach der Filtermittelregenerierung in Abhängigkeit unterschiedlicher Filterflächenbelastungen sowie Intensitäten des Druckluftstoßes. Mit zunehmender Filterflächenbelastung wurde konstatiert, dass keine nennenswerte Ausschleusung des Staubs mehr stattfinden kann.

In [29 p. 197] wird eine Filteranlage zur Filtration feiner Stäube mit wesentlichen Anteilen $< 1 \mu\text{m}$ beschrieben, die nach kurzer Zeit nicht mehr regeneriert werden konnte. Der Grund für diesen kritischen Betriebszustand mit rasch steigenden Restdruckverlusten lag in einer zu hoch gewählten Filterflächenbelastung. Bei derart feinen Stäuben begünstigt dies eine beschleunigte Filtermittellagerung durch zirkulierende Staubanteile.

Auch Probleme bei der Filtration spezifisch leichter und nicht agglomerierender Stäube werden in [27 p. 57] auf zirkulierende Staubanteile zurückgeführt. Insbesondere die Wiederanlagerung abgereinigter Stäube an benachbarten Filterelementen wird in diesem Zusammenhang als Problem betrachtet. Auch höhere Filtrationstemperaturen fördern nach [47 F 30] infolge einer geringeren Agglomerationsneigung zirkulierende Staubanteile.

Der Versuch eines direkten Nachweises und der Quantifizierung zirkulierender Staubanteile wurde anhand eines feinkörnigen Kalksteins unternommen [48]. Dazu kam ein modifizierter Filterprüfstand nach VDI-Richtlinie 3926 Typ 1 (Bild 17) zum Einsatz, der gegenüber dem horizontal angeordneten Reingaskanal (mit Filtermittel 1) einen zusätzlichen Reingaskanal mit identischer Funktionalität (mit Filtermittel 2) besitzt. Der Abstand zwischen den Filtermedien ist variabel; die Filtermittelregenerierung beider Filtermittel kann individuell parametrierbar on- oder off-line erfolgen. Der realisierte Versuchsaufbau ermöglicht die Bestimmung der Staubflächenmassen auf den Filtermitteln (Reinigungsgrad) optisch über die belegte Filterfläche.

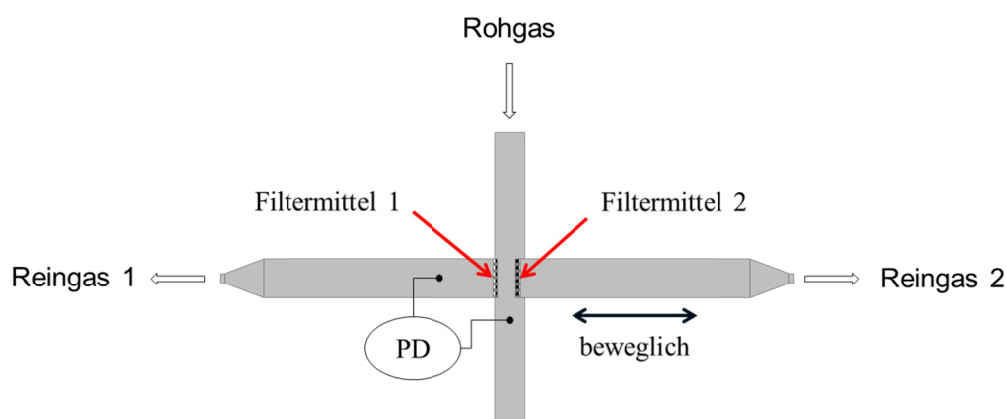


Bild 17: Modifizierter Filterprüfstand Bergische Universität Wuppertal, Fachgebiet Sicherheitstechnik [48], vereinfachte schematische Darstellung mit vertikalem Rohgaskanal und zwei horizontalen Reingaskanälen mit jeweils einem Filtermittel, Differenzdruckmessung (PD) zwischen Roh- und Reingasseite

Der Staub wurde durch die Regenerierung des Filtermittels 1 nahezu vollständig abgereinigt. Die off-line-Regenerierung führte hierbei erwartungsgemäß zu besseren Ergebnissen als die on-line-Regenerierung. Auf dem Filtermedium 2, welches im Rahmen dieses Versuchs nicht regeneriert wurde, lagerten sich dennoch ca. 25 % (infolge off-line-Regenerierung Filtermittel 1) bzw. ca. 10 % (infolge on-line-Regenerierung Filtermittel 1) Staubkuchen ab. Als Grund hierfür wurde ein unterschiedliches Ablöseverhalten des Staubkuchens zwischen on-line- und off-line-Regenerierung gesehen. Mit geringerem Abstand zwischen beiden Filtermitteln konnte zunehmend Staubkuchen auf Filtermedium 2 nachgewiesen werden, der von der Regenerierung des Filtermittels 1 stammt. Gleiches galt für eine steigende Intensität des Druckluftstoßes, wodurch verstärkt Staubkuchen auf dem Filtermittel 2 anfiltrierte wurde. Je nach Strömungsbedingungen betrug dieser Wert bis zu 45 %. Derartig objektive, jedoch seltene, Untersuchungen bestätigen, dass zirkulierende Staubanteile einen erheblichen Einfluss auf die Oberflächenfiltration nehmen können. Auf die energetischen Auswirkungen des Effektes wurde im Rahmen dieser Untersuchungen nicht eingegangen.

Der direkte Erfahrungsaustausch mit zahlreichen Errichtern von Oberflächenfiltern zeigt, dass zirkulierende Staubanteile in der Praxis zum Teil immer noch nicht bewusst wahrgenommen werden. Selten werden deshalb für die Filter spezifische Leistungsreserven direkt vorgehalten und quantitativ berücksichtigt. In den meisten Fällen finden zirkulierende Staubanteile nur indirekt Berücksichtigung bei der Auslegung von Oberflächenfiltern, indem empirisch gewonnene Erfahrungswerte für die zu wählenden prozesstechnischen und konstruktiven Filterparameter herangezogen werden. Da objektive Parameter zur Berücksichtigung zirkulierender Staubanteile nicht zur Verfügung stehen, fehlt wirtschaftlichen Abwägungen eine belastbare Grundlage.

3.2 Einflussgrößen auf zirkulierende Staubanteile

Nachfolgend werden die Einflussgrößen auf zirkulierende Staubanteile im Ergebnis eigener Erhebungen erläutert. Der Erkenntnisstand zur Oberflächenfiltration wird dabei gezielt erweitert. Es wird deutlich, dass zirkulierende Staubanteile durch zahlreiche Anlagen- und Prozessparameter beeinflusst werden und somit ein entscheidender Faktor für die Effizienz von Oberflächenfiltern sind. Bild 18 fasst die Einflussgrößen auf zirkulierende Staubanteile zusammen und gruppiert diese in die Hauptkategorien Staubeigenschaften, Filteraufbau, Prozessführung und Filtermittelregenerierung.

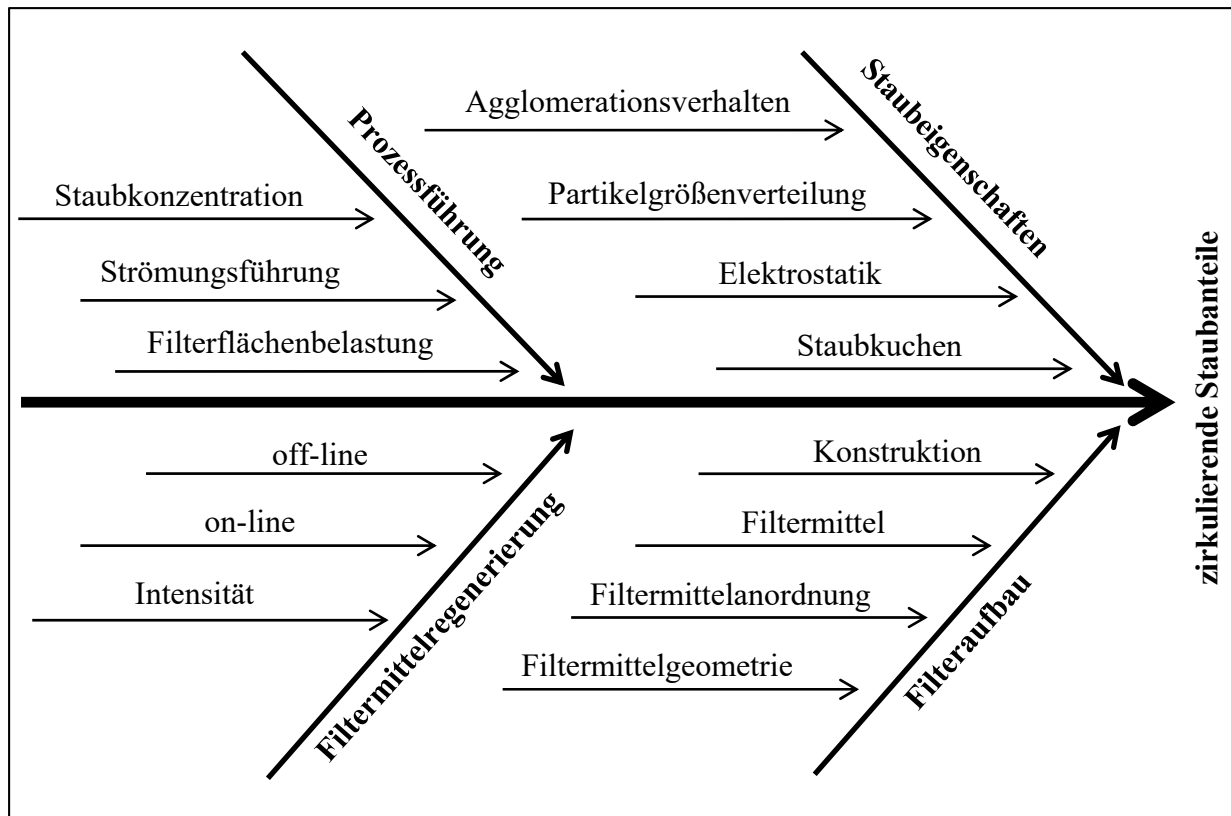


Bild 18: Wesentliche Einflussgrößen auf zirkulierende Staubanteile

Staubeigenschaften

Die Agglomerationsneigung des Staubs ist für zirkulierende Staubanteile entscheidend. Gut agglomerierende Stäube weisen dabei eine geringere Neigung zu zirkulierenden Staubanteilen auf. Feine Partikelgrößenverteilungen und bipolare elektrostatische Aufladungen begünstigen das Agglomerationsverhalten und ermöglichen den Aufbau eines kompakten Staubkuchens, der i. d. R. in Schollenform abgeworfen wird. Zusätzlich bewirkt ein gutes Agglomerationsverhalten eine anteilige Vorabscheidung von Partikeln, die nicht als zirkulierende Staubanteile in Erscheinung treten können. Schlecht agglomerierende (gut fließfähige) Stäube bilden im Gegenzug einen lockeren Staubkuchen aus, welcher durch die Filtermittelregenerierung stärker redispersiert wird und damit zirkulierende Staubanteile fördert.

Filteraufbau

Durch die konstruktive Anordnung des Rohgaseintritts und der damit verbundenen Strömungsführung im Rohgasraum wird direkter Einfluss auf zirkulierende Staubanteile genommen. Eine abwärts gerichtete Strömung im Rohgasraum (*top-down*) reduziert diese. Auch ist der untere

Teil des Rohgasraumes ausreichend zu dimensionieren, um die Strömungsgeschwindigkeit in diesem Bereich zu verringern und Staubaufwirbelungen zu vermeiden. Ein geringer Gassenabstand zwischen den Filtermitteln erleichtert eine Wiederanlagerung abgereinigten Staubs, da Teile des abgereinigten Staubkuchens leichter auf benachbarte Filterelemente geschleudert werden können. Zusätzlich führt ein geringer Gassenabstand zu einer höheren, aufwärts gerichteten, Strömungsgeschwindigkeit zwischen den Filterelementen, da diese vom freien Querschnitt zwischen den Filterelementen abhängt. Auch dieser Effekt begünstigt zirkulierende Staubanteile.

Das Filtermittel stellte sich im Ergebnis eigener Untersuchungen ebenfalls als wichtiger Einflussfaktor auf zirkulierende Staubanteile heraus. Beurteilt wurde dies anhand des durch zirkulierende Staubanteile verursachten Druckverlusts, der anhand unterschiedlicher Stäube und Filtermittel gemessen wurde (siehe Kapitel 3.4). Zirkulierende Staubanteile treten bei Membranfiltermedien in geringerem Umfang auf. Der Grund dafür liegt vermutlich in der Abschwächung des reingasseitigen Druckluftstoßes zur Regenerierung des Filtermittels durch die Membran, wodurch eine geringere Redispergierung des Staubkuchens bei gleichem Regenerierungserfolg bewirkt wird. Dagegen steigt mit zunehmender Schlauchlänge die Gefahr zirkulierender Staubanteile. Nach der Filtermittelregenerierung sedimentierende Stäube treten mit zunehmender Länge der Filterelemente auf dem Weg zum Staubaustragsorgan vermehrt in Wechselwirkung mit der Filtermittelloberfläche. Mit zunehmender Filterfläche je Volumeneinheit Filter, worauf der Schlauchdurchmesser Einfluss nimmt, ist mit einem Anstieg zirkulierender Staubanteile zu rechnen. Im Verhältnis zum Gassenabstand ergibt sich nach [19 p. 237] ein Maximum, wenn der Schlauchdurchmesser gleich dem Gassenabstand ist.

Prozessführung

Eine hohe Filterflächenbelastung begünstigt einerseits zirkulierende Staubanteile, da abgereinigte Stäube auf dem Weg aus dem Prozessraum schneller wieder an der Oberfläche des Filtermittels anfiltrierte werden. Andererseits können hohe Filterflächenbelastungen auch die Ausbildung kompakter Staubkuchen fördern, die weniger zur Redispergierung neigen. Insbesondere im Zusammenhang mit feinen, spezifisch leichten und schlecht agglomerierenden Stäuben besteht die Gefahr zirkulierender Staubanteile speziell für on-line-regenerierte Filter. Die Folgen zirkulierender Staubanteile sind ein höherer Differenzdruck zwischen Roh- und Reingasseite und damit zusätzliche Energieverbräuche. Eine hohe Staubkonzentration im Prozessraum fördert zirkulierende Staubanteile [27 p. 57], die durch eine top-down-Strömung im Rohgasraum gezielt verringert werden.

Filtermittelregenerierung

Je nach Neigung der Stäube zu zirkulierenden Staubanteilen kann eine off-line-Regenerierung weniger zirkulierende Staubanteile als eine on-line-Regenerierung verursachen, da durch den strömungslosen Zustand der Filterelemente ZSA_A ausgeschlossen werden können. Auch die Staubsedimentation zwischen den Filterelementen wird erleichtert, da sich nach der Filtermittelregenerierung im Gegensatz zur on-line-Regenerierung keine aufwärtsgerichtete Strömung ausbildet. Mit zunehmender Intensität der Filtermittelregenerierung können jedoch auch zirkulierende Staubanteile ZSA_B ansteigen, da es verstärkt zur Redispergierung des Staubkuchens und zur Anlagerung abgereinigter Teile des Staubkuchens an benachbarten Filterelementen kommt. Wechselwirkungen der abgereinigten Stäube mit benachbarten Filterelementen können unabhängig von der Art der Filtermittelregenerierung auftreten.

3.3 Dynamik zirkulierender Staubanteile

Aus den bisherigen Erkenntnissen lässt sich die Dynamik zirkulierender Staubanteile im Rohgasraum des Oberflächenfilters ableiten. Bild 19 zeigt die Charakteristik anhand von zwei benachbarten Filterelementen, deren Länge jeweils in drei Segmente unterteilt wurde. Zum Zeitpunkt t_1 findet die on-line-Regenerierung des linken Filterelements per Druckluftstoß statt. Transiente Zustände lassen sich durch Einbeziehung weiterer Filtrationszyklen (Zeitpunkte t_2 - t_n) abbilden. Redispergierter Staub, der sich in horizontaler Richtung nicht weit genug vom Filtermittel entfernt, lagert sich wieder an (ZSA_A). Nach unten erfolgt eine getaktete, sukzessive Bewegung der Stäube z. B. in Parabelform, falls die Staubkuchenstücke oder Partikel nach deren Abreinigung eine Strecke sedimentieren, die kleiner ist als die Länge des Filterelements. Wechselwirkungen mit benachbarten Filterelementen (ZSA_B) wirken ausgehend vom regenerierten Filtermittel in zwei Richtungen. Bei Abgabe zirkulierender Staubanteile in Richtung benachbarter Filterelemente ergibt sich ein negativer Beitrag $ZSA_B^{(-)}$. Werden zirkulierende Staubanteile von benachbarten Filterelementen empfangen, stellt dies einen positiven Beitrag $ZSA_B^{(+)}$ dar. Die Wirkung beider Komponenten auf benachbarte Filterelemente wird als vergleichbar angenommen. Ein je nach Staubeigenschaften unterschiedlich großer Anteil des abgereinigten Staubkuchens wird ohne Wechselwirkung nach unten aus dem Filter ausgetragen. Zur Bestimmung der Anteile aus Bild 19 sind weiterführende Untersuchungen zur Bilanzierung zirkulierender Staubanteile erforderlich (siehe Kapitel 3.5 und 3.6). Dabei wird zwischen beiden Arten zirkulierender Staubanteile differenziert (Indizes A und B).

3.4 Entwicklung einer Methodik zur Bilanzierung zirkulierender Staubanteile

Nachfolgend wird eine neuartige Methodik zur energetischen Bilanzierung zirkulierender Staubanteile vorgestellt, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt wurde. Da in Anbetracht vielfältiger und zunehmend anspruchsvoller Entstaubungsanwendungen mit steigenden energetischen Aufwendungen aufgrund zirkulierender Staubanteile zu rechnen ist, ist diese Methodik von hoher praktischer Relevanz. Folgende Untersuchungsziele sind dabei von herausragender Bedeutung, um zirkulierende Staubanteile zu bilanzieren:

- Quantifizierung zirkulierender Staubanteile,
- Differenzierung verschiedener Arten zirkulierender Staubanteile,
- Klassifizierung unterschiedlicher Stäube hinsichtlich ihrer Neigung zu zirkulierenden Staubanteilen.

3.4.1 Quantifizierung zirkulierender Staubanteile

Bereits *Leubner und Riebel* wählten zur Bestimmung des Abreinigungsgrades von Filtermitteln einen energetischen Ansatz auf Basis von Druckverlusten [49]. Damit kann der Druckverlust des nach der Regenerierung auf dem Filtermittel verbleibenden Staubs (*patchy cleaning*) erfasst werden. Für die Quantifizierung zirkulierender Staubanteile wurde ebenfalls ein energetischer Ansatz gewählt, bei dem die Restdruckverluste on- und off-line-regenerierter Oberflächenfilter verglichen werden. Dieses Vorgehen stellt einen direkten Bezug zwischen zirkulierenden Staubanteilen und dadurch verursachten Druckverlusten her, deren ökonomischen und ökologischen Auswirkungen objektiv betrachtet werden. Zur Quantifizierung der Größenordnung zirkulierender Staubanteile ZSA wurde Formel (27) entwickelt. Dabei wird das Verhältnis des Restdruckverlusts nach on-line-Regenerierung des Filtermittels ($\Delta p_{R,on}$) und des Enddruckverlusts nach Anfiltration gebildet (Δp_E). Der Einfluss zirkulierender Staubanteile auf den Restdruckverlust ist damit direkt abbildbar. Um das Ergebnis nicht durch die Alterung des Filtermittels zu beeinträchtigen, wird von beiden Werten der Restdruckverlust nach Regenerierung des Filtermittels abgezogen, bei dem zirkulierende Staubanteile zuverlässig ausgeschlossen werden können ($\Delta p_{R,0}$).

$$ZSA = \frac{\Delta p_{R,on} - \Delta p_{R,0}}{\Delta p_E - \Delta p_{R,0}} \quad (27)$$

Diese energetische Betrachtung kann experimentell mit einschlägigen Filterprüfständen durchgeführt werden. Dabei kommt ein eigens für diesen Zweck entwickelter Versuchsablauf entsprechend Anhang 3 zur Anwendung, der durch Bild 20 veranschaulicht wird. Dabei wird unter definierten Prozessbedingungen Staub bis zum Enddruckverlust Δp_E anfiltriert (Messung 1), woraufhin eine on-line-Regenerierung des Filtermittels stattfindet. Nach Stabilisierung des Messwertes wird der Restdruckverlust $\Delta p_{R,on}$ gemessen (Messung 2), der den Einfluss zirkulierender Staubanteile beinhaltet. Zum Zeitpunkt der Regenerierung muss der Rohgaskanal dazu z.B. mit Hilfe einer Absaugung in Anlehnung an [50] staubfrei sein, um störende Einflüsse auf diesen Wert zu vermeiden. Der Restdruckverlust ohne zirkulierende Staubanteile $\Delta p_{R,0}$ wird nach off-line-Regenerierung gemessen (Messung 3). Dabei müssen zirkulierende Staubanteile durch technische Maßnahmen sicher ausgeschlossen werden. Für die Untersuchungen werden, wie in [51] empfohlen, bereits konditionierte Filtermittel verwendet.

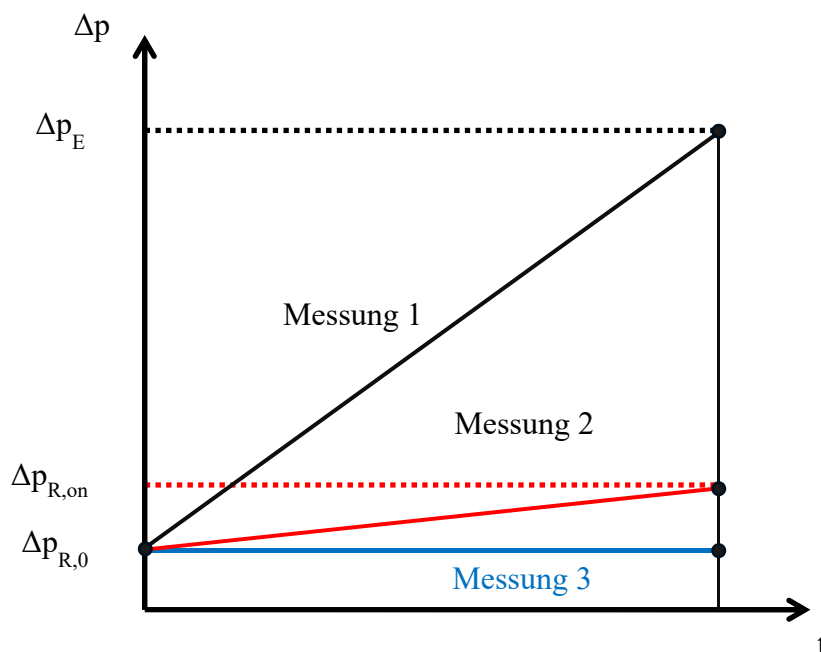


Bild 20: Durchführung von Untersuchungen zur Quantifizierung zirkulierender Staubanteile

3.4.2 Differenzierung zirkulierender Staubanteile

Entsprechend Bild 16 (Kapitel 3.1) existieren zwei Erscheinungsformen zirkulierender Staubanteile in Form der Wechselwirkungen abgereinigter Stäube mit dem regenerierten (ZSA_A) und mit benachbarten Filterelementen (ZSA_B). Zur Differenzierung zirkulierender Staubanteile bieten sich zwei unterschiedliche Versuchsaufbauten an. Genutzt werden kann dazu die Tatsache, dass bei einer Anordnung mit nur einem Filterelement (Einfilteranordnung) ausschließlich ZSA_A anfallen und ZSA_B grundsätzlich ausgeschlossen werden können. ZSA_A fallen nur bei on-line-Regenerierung des Filtermittels an. Bei einer Mehrfilteranordnung können ZSA_A und ZSA_B parallel auftreten. Beide Versuchsaufbauten zeigt Bild 21 schematisch.

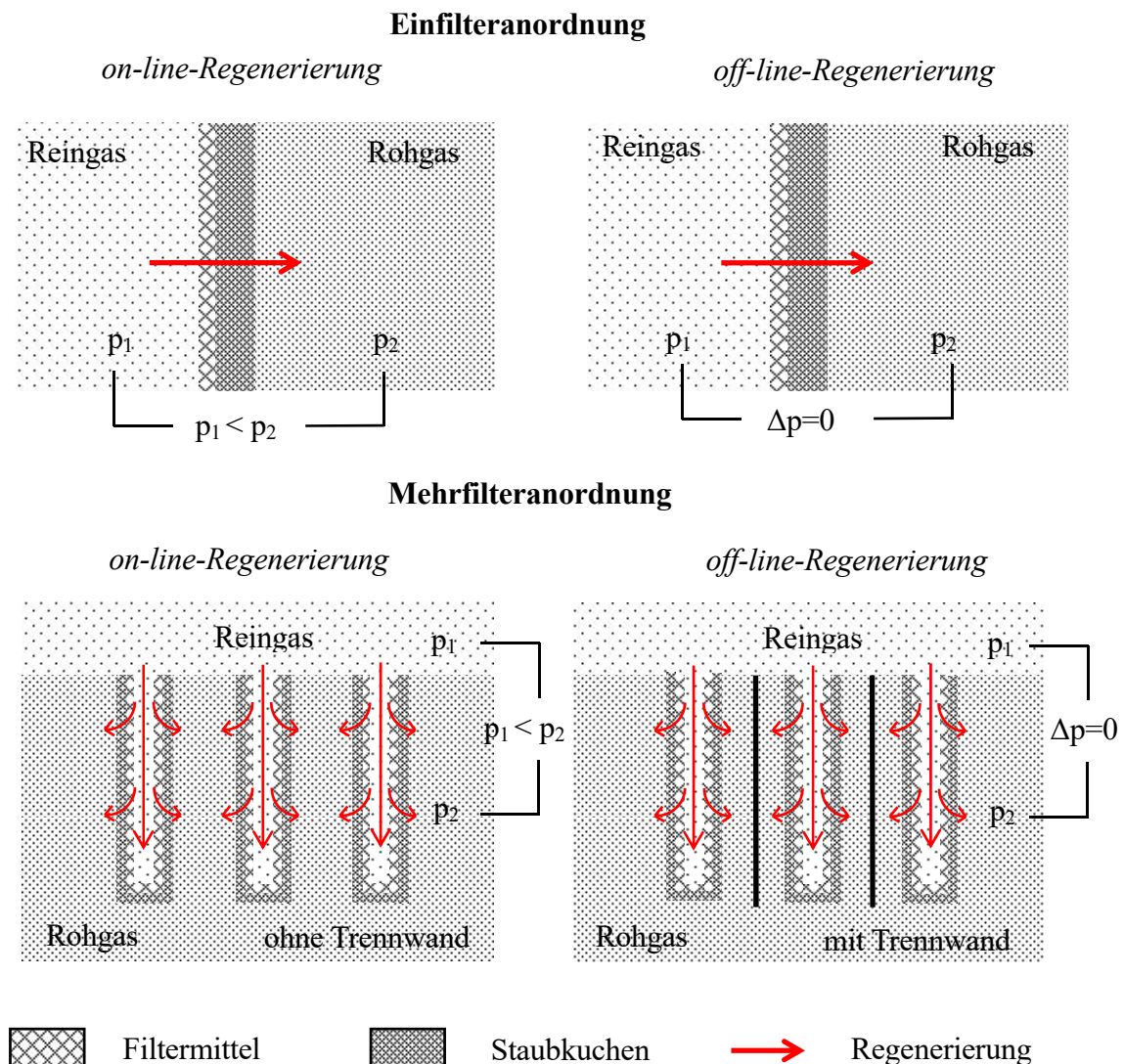


Bild 21: Versuchsanordnungen zur Differenzierung zirkulierender Staubanteile

3.4.3 Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung von ZSA_A

Die Einfilteranordnung aus Bild 21 ermöglicht die direkte Ermittlung des Anteils ZSA_A . Aus Formel (27) ergibt sich Formel (28) mit den Indizes EF für einen Versuchsaufbau mit einem einzelnen Filterelement.

$$ZSA_A = \frac{\Delta p_{R,on,EF} - \Delta p_{R,0,EF}}{\Delta p_{E,EF} - \Delta p_{R,0,EF}} \quad (28)$$

Versuchsaufbau

Für die Untersuchungen wurde ein eigens errichteter Filterprüfstand in Anlehnung an DIN ISO 11057 verwendet, den Bild 22 zeigt. Ein entscheidender Vorteil dieses Filterprüfstands liegt in dem je Versuch verhältnismäßig geringem experimentellem Aufwand für die Versuchsdurchführung. Details zum Versuchsaufbau sind Anhang 4 zu entnehmen. In einen vertikalen Rohgaskanal (1) wird von oben das zu filtrierende Rohgas mit einem Bürstendispergierer (2) eingebracht. Am Übergang zwischen Rohgaskanal und Reingaskanal (3) wird das Filtermittel (4) eingespannt. Der Volumenstrom auf Roh- und der Reingasseite wird geregelt (5), womit auf das Filtermedium eine gleichbleibende Filterflächenbelastung wirkt. Der dazu notwendige Differenzdruck wird durch Vakuumpumpen (6) erzeugt. Der Differenzdruck zwischen Roh- und Reingasseite wird gemessen. Nicht am Filtermittel anfiltrierter Staub gelangt direkt, anfiltrierter Staubkuchen nach der Filtermittelregenerierung in den Staubbunker (7). Das Reingas kann zur gravimetrischen Bestimmung der Staubkonzentration durch einen Absolutfilter (8) geleitet werden. Zum Schutz der Volumenstromregler vor Feststoffpartikeln sowie zur Vermeidung des Austritts von Staub aus dem Prüfstand wurden zusätzlich Schutzfilter auf Roh- und Reingasseite (9) integriert. Zur Regenerierung des Filtermittels steht ein Abreinigungssystem zur Verfügung (10). Dieses besteht aus einem Drucklufttank mit integriertem Membranventil, welches bezüglich seiner Öffnungszeiten parametrierbar ist. Die mittels Druckminderer einstellbare Druckluftstoßintensität kann an zwei Stellen in den Reingaskanal geleitet werden. Auf der Rohgasseite ist hinter dem Staubbunker ein abreinigbarer Filter (11) angeordnet, um überschüssiges Rohgas zu reinigen. Über eine Steuerung können eine zeit- oder differenzdruckgesteuerte Regenerierung des Filtermittels sowie eine automatische Messwerterfassung erfolgen (Abtastrate 1 Hz).

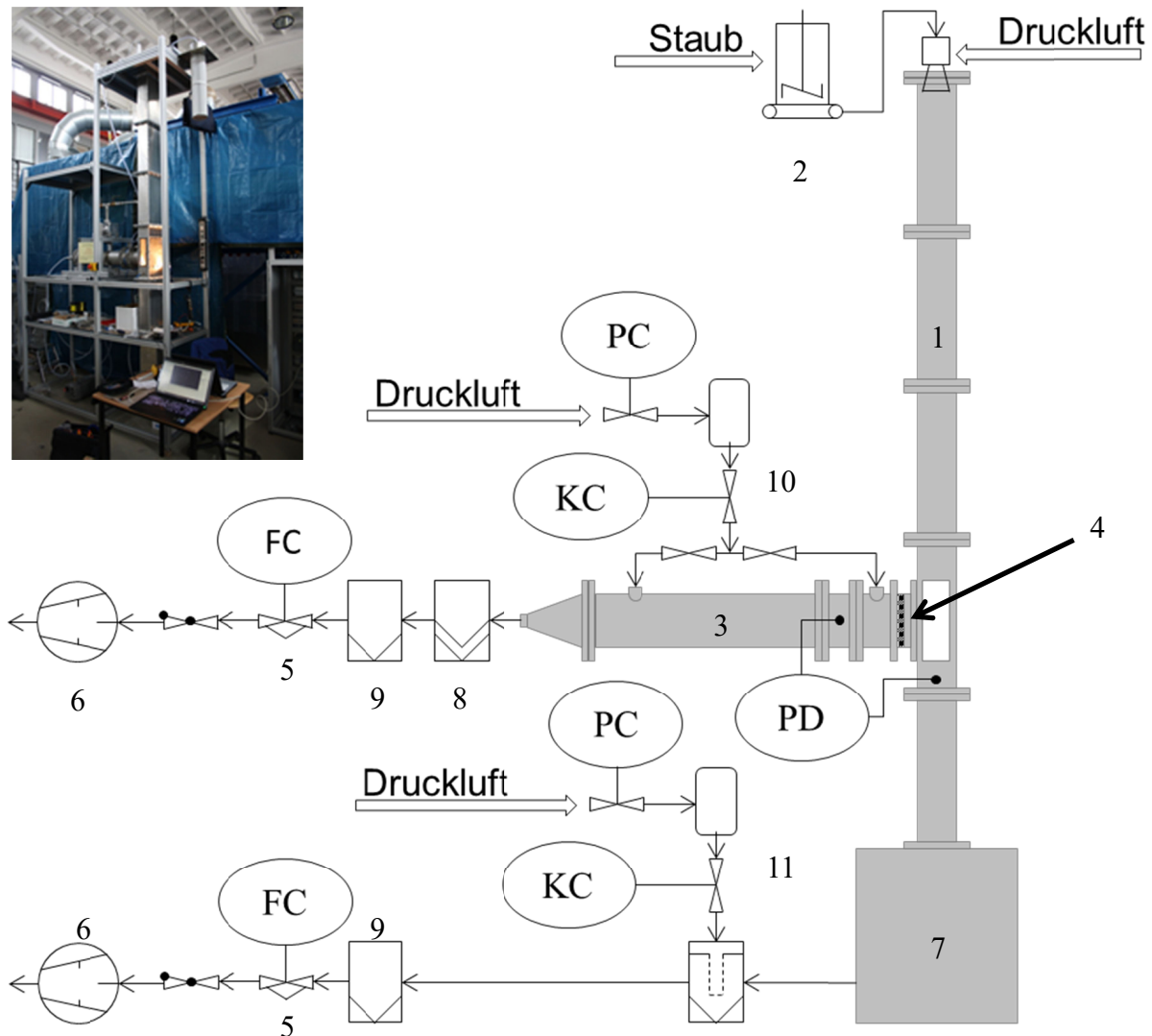


Bild 22: Labor-Filterprüfstand in Anlehnung an DIN ISO 11057 (Eigenbau Hochschule Nordhausen)

Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Die Untersuchungen wurden in Anlehnung an reale Prozessbedingungen anhand ausgewählter Stäube und Filtermittel durchgeführt. Die Anfiltration des Staubkuchens erfolgte variabel entsprechend der jeweiligen Filterflächenbelastung bis zu einem definierten Enddruckverlust (siehe Anhang 3). Als Filtermittel wurden ein Nadelfilz sowie ein Membranfiltermedium verwendet (Datenblätter siehe Anhänge 5a-b). Erprobt wurden die Musterstäube Calcit MX20 und Apyral 16 (siehe Kapitel 2.5.1 sowie Anhang 2a, c). Die Ergebnisse sind in Bild 23 dargestellt und zeigen mit zunehmender Filterflächenbelastung einen scheinbar linearen Anstieg von ZSA_A . Der feine und gut agglomerierende Staub Calcit MX20 weist dabei erheblich geringere zirkulierende Staubanteile auf als der verhältnismäßig grobe und fließfähige Staub Apyral 16. Einzel-

messungen mit dem gut fließfähigen Staub Pural SB (Anhang 2d) ergaben noch deutlich höhere Werte. Unabhängig vom Staub treten höhere zirkulierende Staubanteile ZSA_A bei Verwendung des Nadelfilzes im Vergleich zur Verwendung des Membranfiltermediums auf. Die auf das Stützgewebe aufgebrachte Membran schwächt den reingasseitigen Druckluftstoß offensichtlich ab, wodurch der Staubkuchen weniger redispergiert wird. Beobachtungen des Regenerierungsvorgangs, vergleichbar mit Bild 9 (Kapitel 2.4.3), bestätigen die bei Membranfiltermedien vorwiegende Ablösung des Staubkuchens in Schollenform. Die geringeren Haftkräfte zwischen Staubkuchen und Filtermitteloberfläche bei Membranfiltermedien erleichtern dabei zusätzlich eine effektive Staubkuchenablösung. Im Gegensatz dazu neigt der Staubkuchen bei Nadelfilzen unter vergleichbaren Versuchsbedingungen stärker zur Redisperierung.

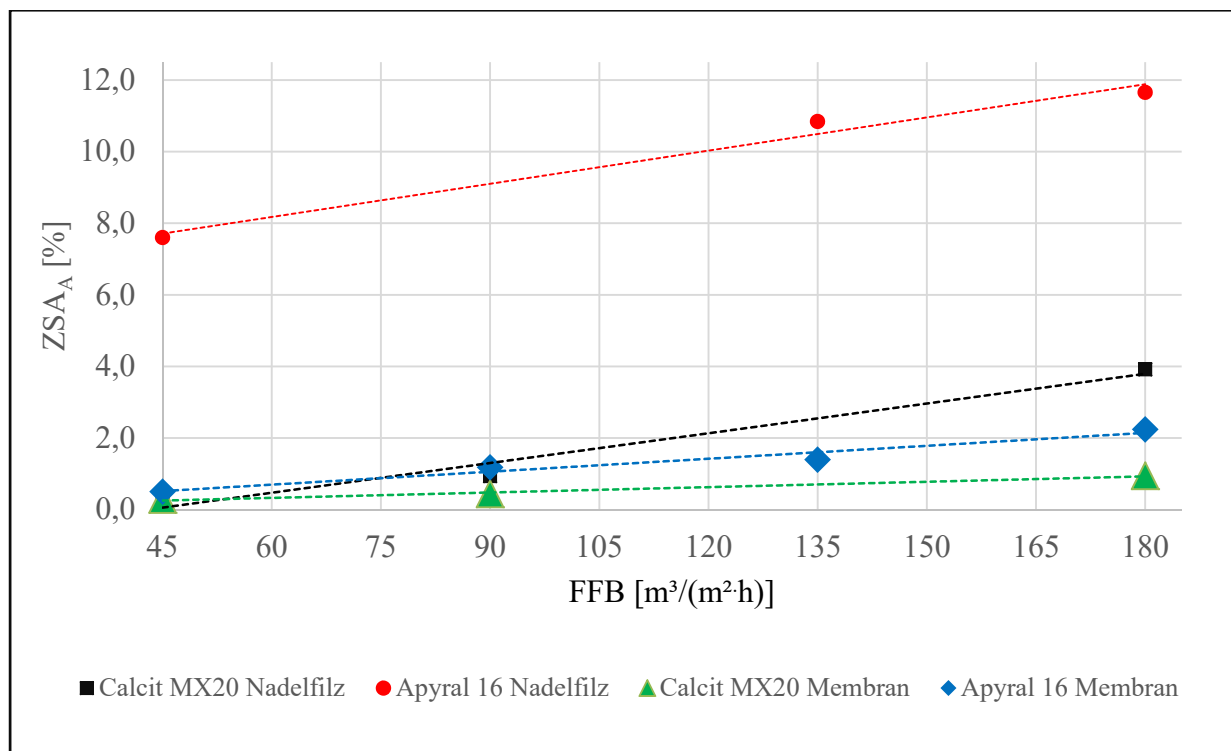


Bild 23: Messung ZSA_A am Filterprüfstand bei variabler Anfiltration (siehe Anhang 6a), Nadelfilz- und Membranfiltermedien entsprechend Anhang 5a-b, Staubdosierung mit Bürstendispersierger bei 1,4 bar Dispersierdruck, und 2 mm/s Förderbandgeschwindigkeit, Bypass 8, Regenerierungsintensität 5,0 bar bei 100 ms elektronischer Ventilöffnungszeit, gestrichelte Linien als lineare Regressionen

3.4.4 Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung von ZSA_{ges}

Die Wechselwirkung abgereinigter Stäube mit benachbarten Filterelementen (ZSA_B) ist mit Mehrfilteranordnungen entsprechend Bild 21 möglich, kann damit jedoch entsprechend Formel (29) nicht direkt bestimmt werden, da sich zirkulierende Staubanteile ZSA_A und ZSA_B additiv zusammensetzen. Zur Bestimmung von ZSA_{ges} wird Formel (27) auf Mehrfilteranordnungen mit dem Index MF adaptiert, woraus sich Formel (30) ergibt.

$$ZSA_B = ZSA_{ges} - ZSA_A \quad (29)$$

$$ZSA_{ges} = \frac{\Delta p_{R,on,MF} - \Delta p_{R,0,MF}}{\Delta p_{E,MF} - \Delta p_{R,0,MF}} \quad (30)$$

Versuchsaufbau

Zur Bestimmung von ZSA_{ges} wurde im Rahmen der Untersuchungen ein Oberflächenfilter im Technikumsmaßstab genutzt. Bild 24 zeigt einen eigens dazu errichteten Technikums-Schlauchfilter; Details dazu können Anhang 7 entnommen werden.

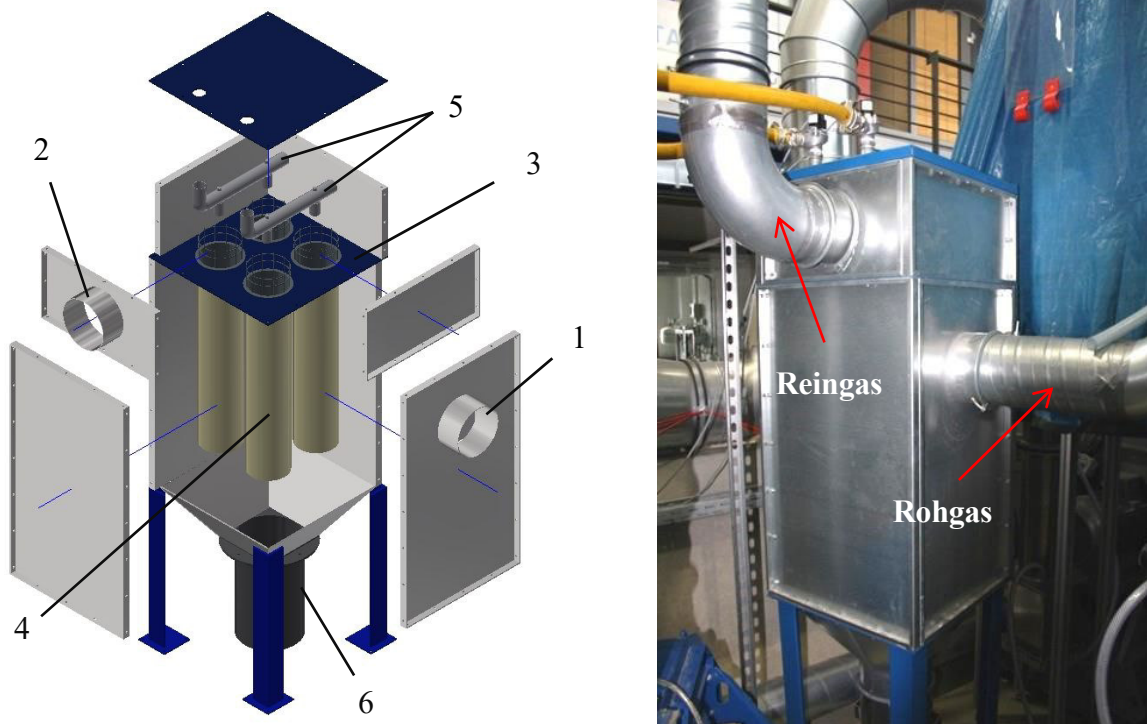


Bild 24: Technikums-Schlauchfilter (Eigenbau Hochschule Nordhausen)

Das Rohgas wird dabei über einen seitlich angebrachten Stutzen (1) in den Rohgasraum dosiert (Höhe 1000 mm, Grundfläche 600 x 600 mm), worin es über eine Prallplatte verteilt wird. Das Reingas verlässt den aufgesetzten Reingasraum (Höhe ca. 300 mm) über einen mittig angeordneten Stutzen (2). Die Kopfplatte (3) wurde zur Aufnahme von bis zu vier Filterschläuchen (4) einschließlich Stützkorb des Durchmessers 150 mm bei einem Gassenabstand von 45 mm konzipiert. Die Regenerierung der Filterschläuche erfolgt reingasseitig per Druckluftstoß, welcher reihenweise möglich ist (5). Abgeschiedener Staub wird im Staubbunker gesammelt (6).

Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Die orientierenden Versuche erfolgten mit einem Nadelfilzfiltermedium sowie den Stäuben Calcit MX20 und Apyral 16 (Bild 25). Dabei zeigt sich für den Staub Apyral 16 bei höherer Filterflächenbelastung ein größerer Anteil zirkulierender Staubanteile ZSA_{ges} , was konsistent zu den Untersuchungen am Filterprüfstand mit Messung von ZSA_A ist. Bei dem Staub Calcit MX20 dagegen scheint die Filterflächenbelastung nahezu keinen Einfluss auf ZSA_{ges} zu nehmen. Gegenüber ZSA_A zeigen sich für ZSA_{ges} stets höhere Werte, was ebenfalls den Erwartungen entspricht.

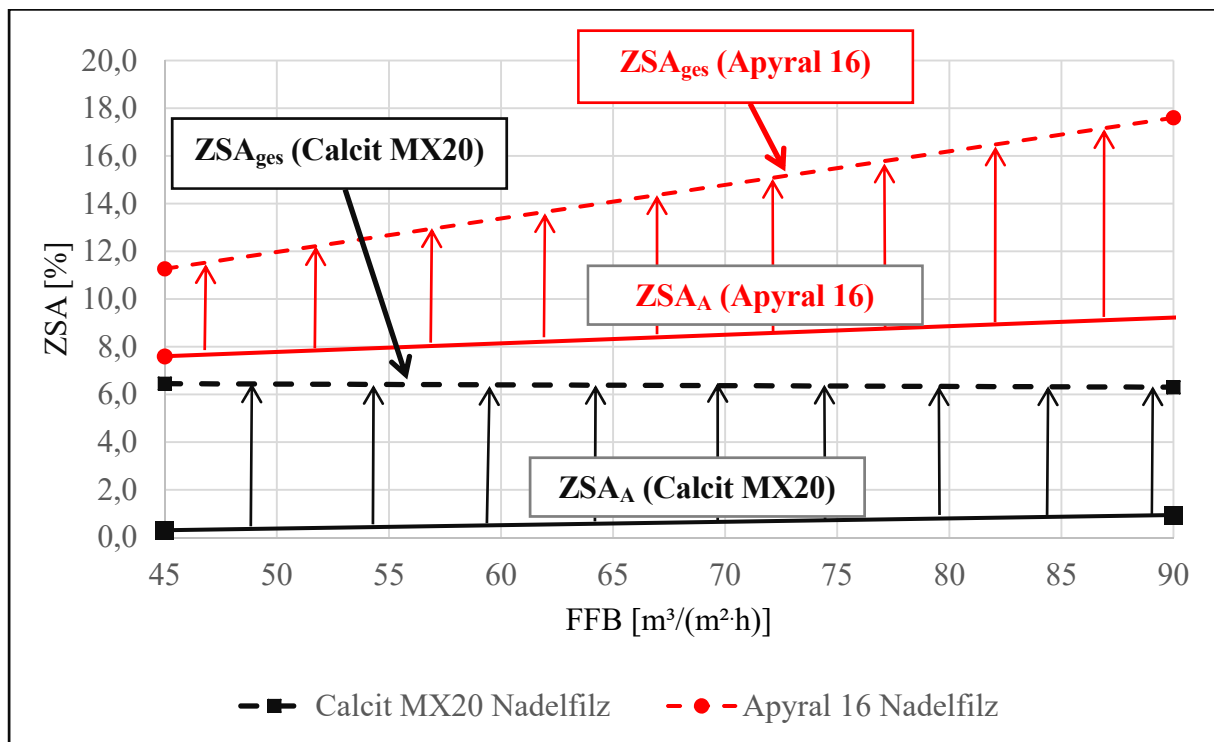


Bild 25: Messung ZSA_{ges} an Technikums-Schlauchfilteranlage (Anhang 6b) im Vergleich zu ZSA_A , Nadelfilzfiltermedium (Anhang 5a), Staubdosierung mit Bürstendispersierger bei 1,4 bar Dispersiergedruck, 2 mm/s Förderbandgeschwindigkeit, Bypass 8, Regenerierungsintensität 5,0 bar bei 100 ms elektronischer Ventilöffnungszeit

Im Ergebnis der experimentellen Untersuchungen wurde die Wirkung zirkulierender Staubanteile bei Variation ausgewählter Parameter energetisch quantifiziert. Die Bestimmung von ZSA_A und ZSA_{ges} ermöglicht die Differenzierung zirkulierender Staubanteile nach ihrer bevorzugten Wechselwirkung mit den regenerierten (ZSA_A) und zusätzlich mit benachbarten Filterelementen (ZSA_{ges}). Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich im nächsten Schritt Stäube mit vergleichbaren Eigenschaften in Klassen einteilen.

3.4.5 Klassifizierung zirkulierender Staubanteile

Auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen wurde eine Klasseneinteilung ausgewählter Stäube unter den jeweiligen Prozessbedingungen exemplarisch vorgenommen (Bild 26). Auf der Ordinate ist die Größenordnung zirkulierender Staubanteile in drei Klassen aufgetragen (ZSA_{ges}). Die Abszisse unterscheidet entsprechend der bevorzugten Art zirkulierender Staubanteile die Klassen A (Tendenz zu ZSA_A), B (Tendenz zu ZSA_B) sowie einer Übergangsform AB. Der Vorteil dieser Klassifizierung ist die Möglichkeit zur Entwicklung und Anwendung standardisierter, staubspezifischer Strategien zur Vermeidung zirkulierender Staubanteile.

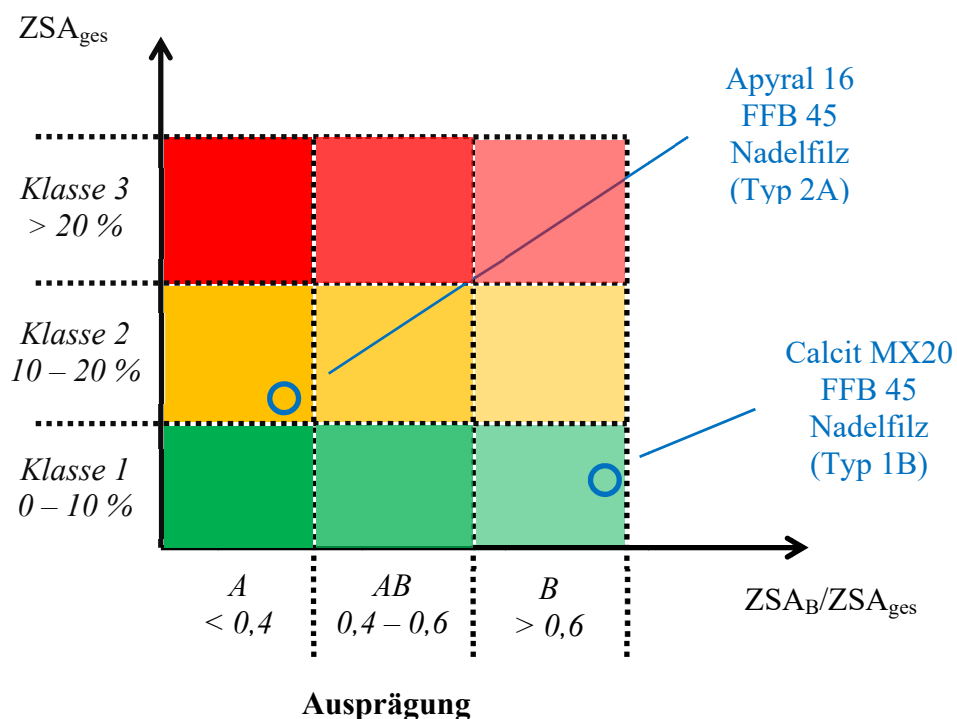


Bild 26: Klassifizierung zirkulierender Staubanteile

Das Verhalten der Stäube Calcit MX20 und Apyral 16 mit einem Nadelfilzfiltermedium bei einer Filterflächenbelastung von $45 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ wurde entsprechend Bild 26 klassifiziert. Für Calcit MX20 ergibt sich unter diesen Rahmenbedingungen mit dem Technikums-Schlauchfilter eine schwache Neigung zu zirkulierenden Staubanteilen mit ca. 6,2 % ZSA_{ges} (Klasse 1). Bedingt durch den geringen Anteil ZSA_A mit ca. 0,3 % treten ca. 95 % der zirkulierenden Staubanteile in Wechselwirkung mit benachbarten Filterelementen (Ausprägung B). Daraus resultiert die Staubklasse 1B. Dieses Ergebnis bestätigen die bekannten Eigenschaften des Calcits als gut agglomerierenden und verhältnismäßig einfach zu filtrierenden Staub. Analoge Betrachtungen des Staubs Apyral 16 zeigen mit ca. 11,3 % ZSA_{ges} eine deutlich stärkere Neigung des Staubs zu zirkulierenden Staubanteilen (Klasse 2). Mit ca. 7,6 % ZSA_A entfallen nur ca. 33 % der zirkulierenden Staubanteile auf Wechselwirkungen mit benachbarten Filterelementen (Ausprägung A). Es ergibt sich die Klasse 2A. Auf Basis dieser Erkenntnisse ist es möglich, gezielt Maßnahmen zur Reduzierung und Vermeidung zirkulierender Staubanteile zu ergreifen, die über allgemeine Ziele der Oberflächenfiltration nach Stand der Technik hinausgehen.

Der Staub Apyral 16 mit verhältnismäßig hohen zirkulierenden Staubanteilen sollte exemplarisch für einen schlecht agglomerierenden Staub bevorzugt mit Membranfiltermedien filtriert werden, wie die Untersuchungen zur Bestimmung von ZSA_A entsprechend Bild 23 zeigen. Eine gleichzeitige off-line-Regenerierung der Filterelemente sowie der Einsatz einer Zwischengassenabreinigung könnten zu einer signifikanten Effizienzsteigerung der Oberflächenfiltration führen. Zur Reduzierung der zirkulierenden Staubanteile des Calcit MX20 (gut agglomerierender Staub) ist der Gassenabstand zwischen den Filterelementen möglichst groß zu wählen. Die räumliche Trennung der Filtermittel verspricht eine deutliche Effizienzsteigerung, kommt jedoch in der Praxis bisher nicht zum Einsatz.

3.5 Bilanzierung zirkulierender Staubanteile

Die Untersuchungen zirkulierender Staubanteile ermöglichen jetzt deren Bilanzierung. Bild 27 visualisiert dazu die gesammelten Erkenntnisse anhand eines regenerierten Filterelements (im Bild links), welches in einem Oberflächenfilter mit benachbarten Filterelementen in Wechselwirkung steht. Das Rohgas im Prozessraum setzt sich aus zuströmendem Rohgas (primäres Rohgas) und zirkulierenden Staubanteilen (sekundäres Rohgas, rote Pfeile) zusammen. Letzteres tritt durch Redispergierung des Staubkuchens anteilig in Wechselwirkungen mit dem regenerierten Filterelement (ZSA_A). Bestandteile des abgereinigten Staubkuchens können ebenfalls auf

benachbarten Filterelementen abgelagert werden (ZSA_B), wobei es sich um einen wechselseitigen Prozess handelt. Zirkulierende Staubanteile können abgegeben ($ZSA_B^{(-)}$) bzw. empfangen werden ($ZSA_B^{(+)}$). Infolge zirkulierender Staubanteile wird die in den Oberflächenfilter gelangende Staubfracht nicht direkt wieder vollständig aus dem Prozess ausgetragen (grüne Pfeile).

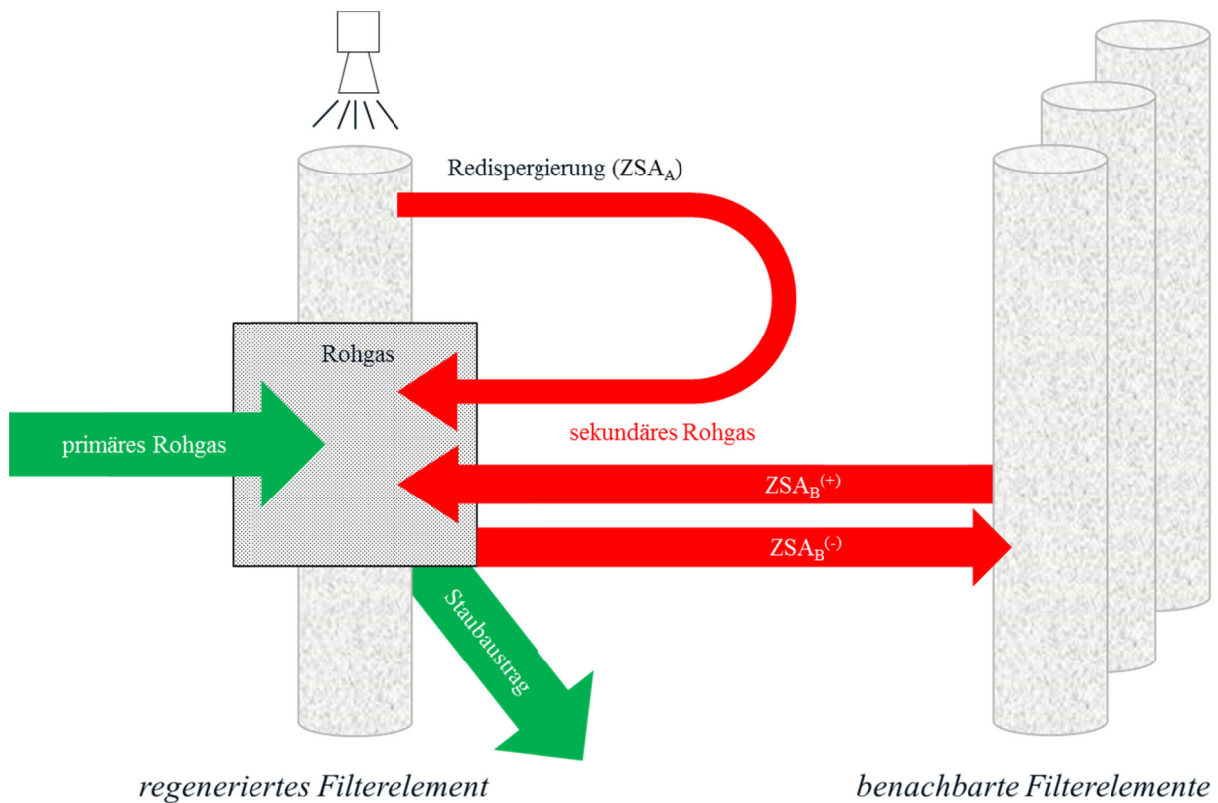


Bild 27: Bilanzierung zirkulierender Staubanteile

3.5.1 Auswirkungen auf Stromverbrauch

Auf Basis des entwickelten Ansatzes zur Dynamik zirkulierender Staubanteile nach Bild 19, kombiniert mit den Ergebnissen eigener experimenteller Untersuchungen entsprechend Kapitel 3.4.5, werden die Auswirkungen zirkulierender Staubanteile auf den Stromverbrauch exemplarisch erläutert. Die Werte für ZSA_A konnten dabei direkt übernommen werden. Hinsichtlich ZSA_B mussten Anpassungen vorgenommen werden, da der Versuchsaufbau aus vier Filterelementen bestand (Bild 28 links), wobei jedes regenerierte Filterelement in Wechselwirkung mit drei benachbarten Filterelementen steht. Dieser Unterschied zu Verhältnissen existierender Oberflächenfilter mit maximal acht benachbarten Filterelementen (Bild 28 rechts) wurde rechnerisch ausgeglichen, indem der Wert ZSA_B mit dem Faktor $8/3$ multipliziert wurde.

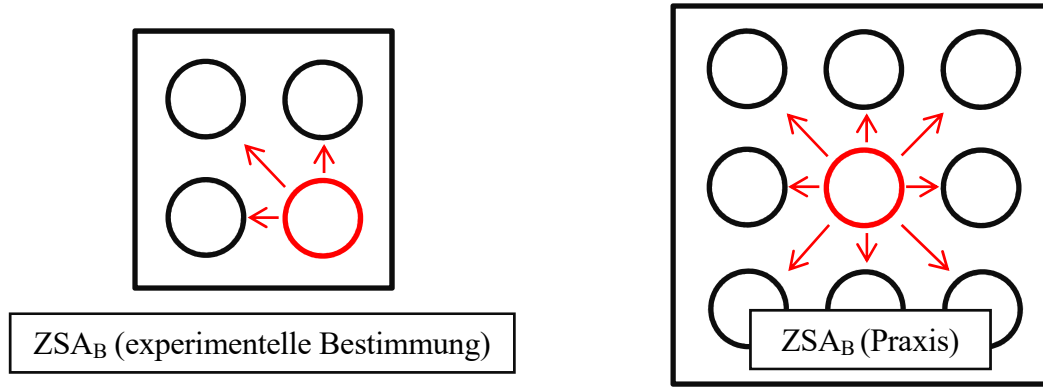


Bild 28: Wechselwirkungen zwischen regenerierten (rot) und benachbarten Filterelementen (schwarz)

Bezüglich der Anzahl der Wechselwirkungen zirkulierender Staubanteile mit der Filtermittelloberfläche N_{ZSA} entsprechend Formel (26) werden Annahmen getroffen, da dieser Wert nicht bekannt ist. Bei einer Filtermittellänge L_{FE} von 3 m ergeben sich mit einem je Filtrationszyklus zurückgelegten Weg $L_{ZSA,y}$ von 1 m drei Wechselwirkungen. Der Druckverlust des Staubkuchens Δp_{SK} ist nach der ersten Regenerierung anteilig auf zirkulierende Staubanteile zurückzuführen. In den darauffolgenden Filtrationszyklen können diese erneut anteilig als zirkulierende Staubanteile in Erscheinung treten, bis sie aus dem Prozessraum ausgetragen werden. Der wachsende Einfluss zirkulierender Staubanteile mit zunehmender Anzahl an Wechselwirkungen mit dem Filtermittel N_{ZSA} lässt sich getrennt für ZSA_A (Formel (31)) und ZSA_B (Formel (32)) als Potenzreihe beschreiben.

$$ZSA_A = \sum_{n=1}^{N_{ZSA}} ZSA_A^n \quad (31)$$

$$ZSA_B = \sum_{n=1}^{N_{ZSA}} ZSA_B^n \quad (32)$$

Bild 29 i. V. m. Anhang 8 zeigt am o. g. Beispiel des Staubs Apyral 16 den prozentualen Anteil der durch zirkulierende Staubanteile (sekundäres Rohgas) verursachten Druckverluste.

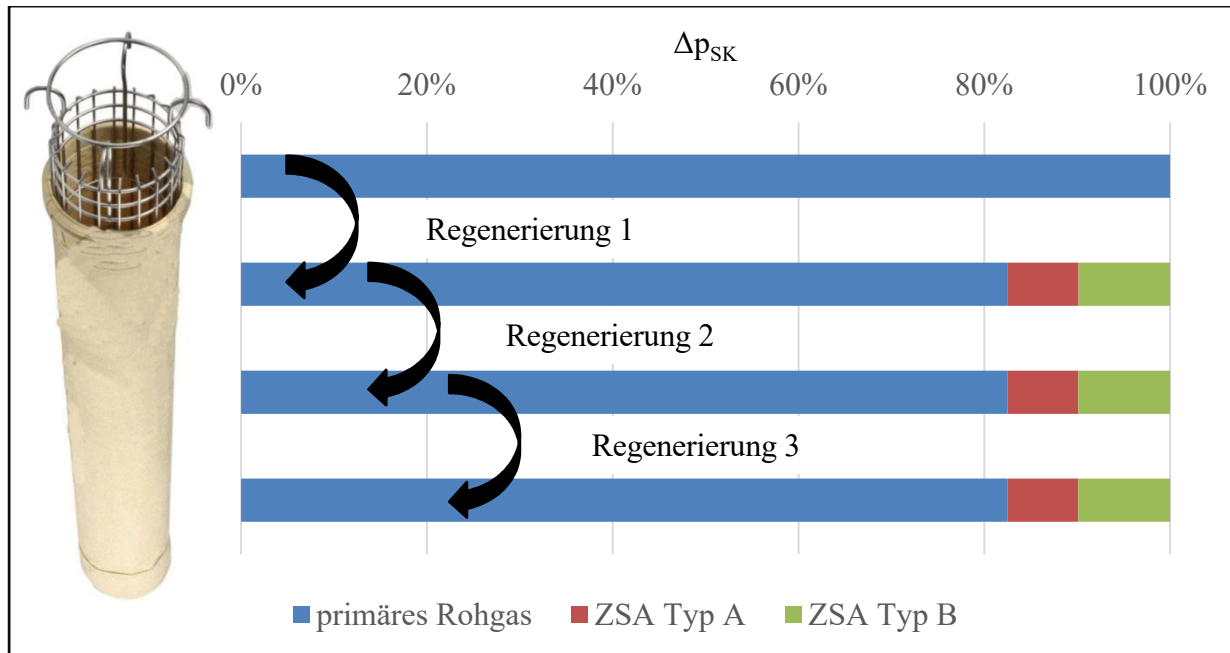


Bild 29: Zusammensetzung der Druckverluste des Staubkuchens (Apyral 16 / Beispiel Kapitel 3.4.5, Anhang 8)

Im Vergleich dazu ist der Druckverlust abgebildet, der durch primäres Rohgas verursacht wird. Es ist zu erkennen, dass der durch zirkulierende Staubanteile verursachte Druckverlust nach der ersten Regenerierung des Filtermittels nur noch geringfügig steigt. Dies erfolgt unter der Annahme, dass sich mehrfach zirkulierende Staubanteile vergleichbar verhalten. Nach vier Filtrationszyklen (drei Regenerierungen) wird ein stationärer Zustand erreicht.

Bild 30 verdeutlicht anhand drei unterschiedlicher Szenarien für zirkulierende Staubanteile, die analog zu Bild 29 auf Basis eigener Versuchsergebnisse berechnet wurden, wie stark der Aufbau des Staubkuchens durch zirkulierende Staubanteile beeinträchtigt wird. Als Indikation dient dabei der effektiv für primäres Rohgas nutzbare Druckverlust $\Delta p_{SK,eff}$, der sich nach Formel (33) berechnet.

$$\Delta p_{SK,eff} = \Delta p_{SK} \cdot (1 - ZSA_A - ZSA_B) \quad (33)$$

Szenario 1 geht ausschließlich von ZSA_A aus. Bei Szenario 2 fallen ZSA_A und ZSA_B zu gleichen Teilen an; Szenario 3 berücksichtigt nur ZSA_B . Gerechnet wird mit einem stationären Zustand, der hinsichtlich Anzahl der Wechselwirkungen N_{ZSA} auf den gleichen Annahmen basiert wie Bild 29.

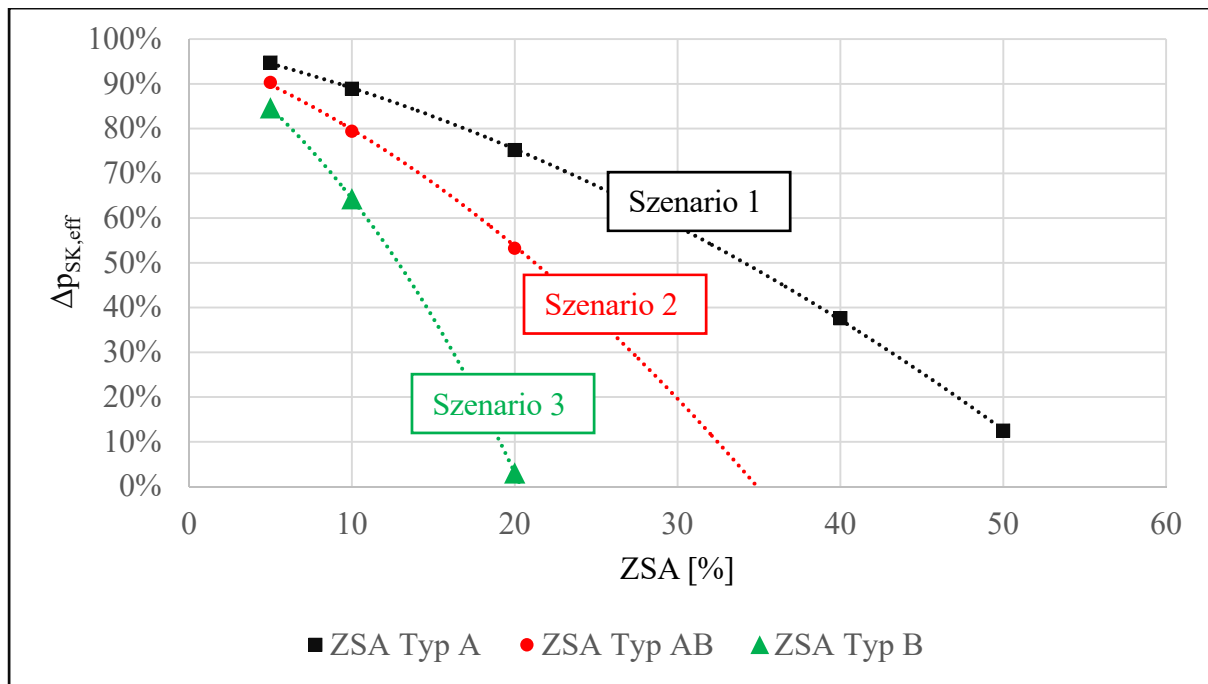


Bild 30: Rückgang der auf primäres Rohgas zurückzuführenden Druckverluste in Abhängigkeit verschiedener Szenarien zirkulierender Staubanteile

Es zeigt sich deutlich, dass ZSA_B (Szenario 3) den stärksten Rückgang des auf primäres Rohgas zurückzuführenden Differenzdrucks bewirkt. Bedingt durch die Wechselwirkungen des regenerierten Filterelements mit acht benachbarten Filterelementen wird der Differenzdruck des Staubkuchens bereits ab ca. 13 % ZSA_B zu 50 % durch zirkulierende Staubanteile verursacht. Diese Zusammensetzung von Δp_{SK} wird bei den anderen Szenarien erst bei größeren Anteilen zirkulierender Staubanteile ab ca. 35 % (Szenario 1) bzw. ca. 22 % (Szenario 2) erreicht. Es zeigt sich hierbei der große Einfluss des Versuchsaufbaus auf die Messung zirkulierender Staubanteile. Ab einer ausreichenden Anzahl interagierender Filterelemente (mindestens 9) bzw. bei Messungen an realen Filteranlagen entfallen Unterscheidungen entsprechend Bild 30.

Bei differenzdruckgesteuerter Betriebsweise wird gegenüber einer idealen Filtration ohne zirkulierende Staubanteile der Enddruckverlust Δp_E somit stets vorzeitig erreicht, obwohl die identische Menge primären Rohgases abgeschieden wird. Die energetischen Folgen zirkulierender Staubanteile auf die Oberflächenfiltration werden exemplarisch am Beispiel eines Staubkuchens demonstriert, dessen Druckverlust zu 50 % auf zirkulierende Staubanteile zurückzuführen ist (Bild 31). Diese in der Praxis nur in Ausnahmefällen zu erwartende Größenordnung veranschaulicht gut die energetische Wirkung zirkulierender Staubanteile. Dargestellt sind ein idealer Oberflächenfiltrationsprozess ohne zirkulierende Staubanteile (Bild 31 links) mit der Zyklus-

zeit t_Z . Diese halbiert sich bei einem realen Prozess mit 50 % zirkulierenden Staubanteilen, da der Druckverlust durch die Regenerierung nur um den Anteil nicht zirkulierender Stäube reduziert werden kann (Bild 31 rechts). Folglich erhöht sich der energetische Aufwand des Staubkuchenaufbaus um den Anteil zirkulierender Staubanteile (schraffierte Fläche Bild 31 rechts). Durch Korrelation des Differenzdrucks mit der Leistungsaufnahme des Ventilators können die Auswirkungen zirkulierender Staubanteile auf den Stromverbrauch für jede Anwendung zur Oberflächenfiltration quantifiziert werden.

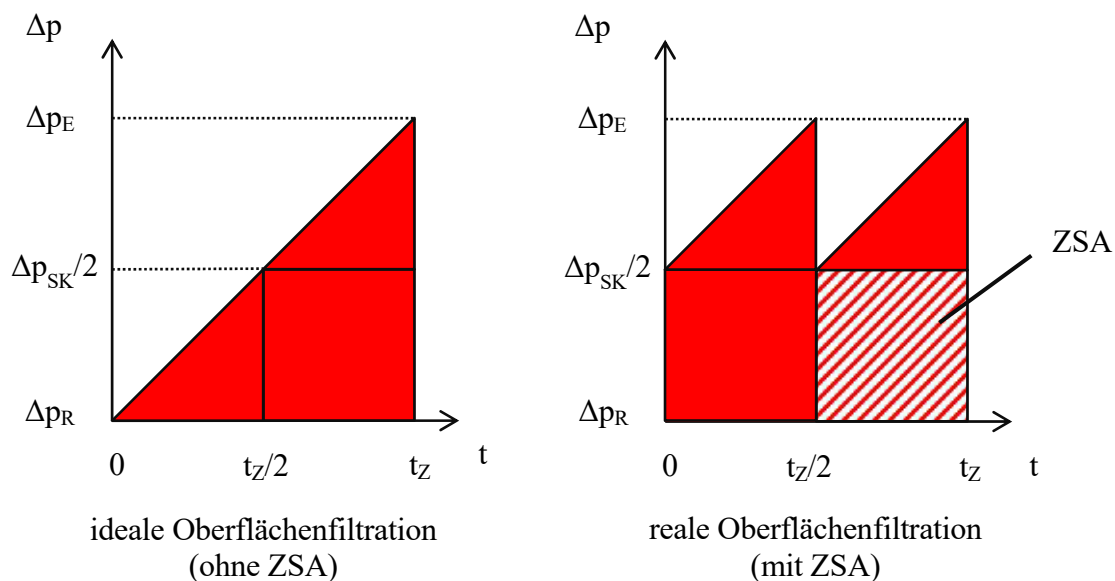


Bild 31: Energetische Folgen zirkulierender Staubanteile auf den Druckverlust des Staubkuchens

3.5.2 Auswirkungen auf Staubemissionen und Druckluftverbrauch

Die Staubemissionen eines Oberflächenfilters treten maßgeblich infolge der Filtermittelregenerierung auf (siehe Bild 11). Verkürzen sich die Filtrationszyklen bedingt durch zirkulierende Staubanteile entsprechend Bild 31 rechts auf $t_Z/2$, so erhöht sich die Anzahl der erforderlichen Filtermittelregenerierung um den Faktor 2, obwohl gegenüber der idealen Oberflächenfiltration die identische Staubmenge aus primärem Rohgas abgeschieden wird. Damit ist eine Verdoppelung der spezifischen Staubemissionen sowie des spezifischen Druckluftbedarfs verbunden. Weiterhin bewirkt die häufigere Regenerierung eine beschleunigte Alterung des Filtermittels, was dessen Standzeit verkürzt und durch den Anstieg des Restdruckverlusts höhere Stromkosten verursacht.

3.6 Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen

Mit der entwickelten Methodik zur Bilanzierung zirkulierender Staubanteile kann jeder beliebige Staub hinsichtlich seiner Neigung zu zirkulierenden Staubanteilen quantifiziert, differenziert und klassifiziert werden. Verschiedene Stäube können somit sowohl untereinander als auch im Kontext unterschiedlicher Prozessbedingungen gut miteinander verglichen werden. Aus den gewonnenen Erkenntnissen können für Oberflächenfilter spezifische Strom- und Druckluftverbräuche sowie Staubemissionen ermittelt werden, deren Ursache in zirkulierenden Staubanteilen liegt. Auf dieser Datengrundlage lassen sich Maßnahmen zur Vermeidung zirkulierender Staubanteile ökonomisch und ökologisch objektiv beurteilen, womit ein Anreiz zur Steigerung der Effizienz von Oberflächenfiltern bereits in der Konzeptionsphase geschaffen wird. Es kann im Ergebnis der Umsetzung spezifischer Maßnahmen in Aussicht gestellt werden, Druckverluste signifikant zu reduzieren, die auf zirkulierende Staubanteile zurückzuführen sind.

Die für die Bilanzierung zirkulierender Staubanteile erforderliche Bestimmung von ZSA_A bietet sich im Labormaßstab mit Filterprüfständen in Anlehnung an DIN EN ISO 11057 an. Hierbei sollte eine Datenbank erarbeitet werden, die unterschiedliche Stäube und Filtermittel unter verschiedenen Prozessbedingungen wie z.B. Filterflächenbelastung oder Regenerierungsintensität enthält. Bei Nutzung eines Filterprüfstands in Anlehnung an Bild 17, der um ein zweites Filtermittel erweitert wurde, ist eine direkte Bestimmung von ZSA_B möglich. Die Untersuchung zusätzlicher Parameter wie z. B. der Abstand zwischen den Filtermitteln ist möglich, wenn das zweite Filtermittel verfahrbar ist; die Datenbank könnte entsprechend erweitert werden.

Bei indirekter Bestimmung von ZSA_B über ZSA_{ges} existiert mit bereits installierten (realen) Filteranlagen eine Alternative zu Technikums-Filteranlagen. Im Zuge geplanter Anlagenstillstände (z.B. im Rahmen von Instandhaltungsaktivitäten) kann dazu ein gegenüber Anhang 3 leicht modifizierter Versuchsablauf zur Anwendung kommen. Dabei ist die Bestimmung des Restdruckverlusts ohne Beeinflussung zirkulierender Staubanteile nur in begrenztem Maß möglich, da eine räumliche Abtrennung der Filterelemente nur schwer oder nicht zu realisieren ist. Der Druckverlust kann dennoch angenähert werden, indem die Rohgaszufuhr des Filters abgeschaltet und dieser mehrfach off-line regeneriert wird. Anschließend muss der Filter eine angemessene Zeit abgeschaltet werden, so dass die im Rohgasraum enthaltenen Staubpartikel in den Staubbunker sedimentieren können. Die off-line-Regenerierung bei abgeschaltetem Filter muss ggfs. wiederholt werden, um zirkulierende Staubanteile zu minimieren. Als Anhaltspunkt dazu kann das Austragsorgan des Filters dienen, aus dem bei Staubfreiheit im Rohgasraum des Filters

kein Staub mehr ausgetragen wird. Die jeweiligen Rahmenbedingungen für diese alternative Bestimmung von $\Delta p_{R,0}$ sind jedoch stets individuell festzulegen.

Neben der Bestimmung von ZSA_A und ZSA_B ist für die Quantifizierung der Energieverbräuche und Staubemissionen die Anzahl der Wechselwirkungen zirkulierender Staubanteile N_{ZSA} entsprechend Formel (26) erforderlich. Zur Bestimmung des je Filtrationszyklus zurückgelegten Weges $L_{ZSA,y}$ sind weiterführende Untersuchungen notwendig. Ziel ist es, die Dynamik zirkulierender Staubanteile entsprechend Bild 19 vollständig zu erfassen und diese transient auf ihrem Weg durch den Oberflächenfilter zu betrachten. Dies betrifft sowohl die Eigenschaften des Staubkuchens mit Auswirkungen auf dessen Redispergierung und damit der Größenordnung zirkulierender Staubanteile als auch deren Bewegungsmuster im Rohgasraum des Filters. Für die grundlegenden Untersuchungen bieten sich Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen in Kombination mit rechnergestützten Simulationen an.

4 Errichtung und Betrieb effizienter Oberflächenfilter

Das vorliegende Kapitel liefert einen Leitfaden zur Errichtung effizienter Oberflächenfilter, deren Betrieb ein erhebliches Potenzial zur Reduzierung von (Fein)staubemissionen sowie zur Steigerung der Energieeffizienz bietet. Hierdurch ergeben sich zum einen Wettbewerbsvorteile für Errichter und Betreiber effizienter Oberflächenfilter und zum anderen wird ein aktiver Beitrag zur Realisierung der bundesdeutschen Umweltziele in einem internationalen Umfeld geleistet. Dem umfassenden Einsatz effizienter Filter steht ein großer ökonomischer Druck auf Errichter und Betreiber von Oberflächenfiltern entgegen, da der Fokus auf geringe Investitionskosten gerichtet ist. Dies ist problematisch, da ein bedeutender Anteil der Kosten nach der Errichtung in der Betriebsphase entsteht. Als Gründe hierfür sind eine unzureichende Fokussierung auf Querschnittstechnologien und mangelndes Prozessverständnis zu sehen. Fehlende, unzureichende oder schlecht handhabbare Vorgaben zur Energieeffizienz sowie oft verhältnismäßig einfach einzuhaltende Emissionsgrenzwerte stellen weitere Hürden für eine nachhaltige Weiterentwicklung und den Einsatz effizienter Oberflächenfiltern dar.

Als Instrument zur Verbreitung effizienter Oberflächenfilter wird zunächst die Methodik zur Ermittlung der Lebenszykluskosten vorgestellt, welche eine ganzheitliche Betrachtung der Oberflächenfiltration ermöglicht (Kapitel 4.1). Für dessen zielgerichtete Anwendung bieten sich Produktkonfiguratoren an. Möglichkeiten zur Absicherung der Anlagenauslegung werden in Kapitel 4.2 vorgestellt, wodurch spezifische Erfahrungswerte nutzbringend im Sinne effizienter Anwendungen ergänzt und abgesichert werden können; Best Practice-Beispiele werden diskutiert. Die Energieeffizienz von Oberflächenfiltern steht im Fokus von Kapitel 4.3. Vorteile hochwertiger Anlagenkomponenten werden erläutert, zu deren Implementierung bestehende finanzielle Anreizsysteme genutzt werden können. Die sich daraus ergebende energetische Bewertung von Oberflächenfiltrationsprozessen ist entscheidend für deren Effizienz und wird in Kapitel 4.4 diskutiert.

4.1 Ganzheitliche Betrachtung der Effizienz von Oberflächenfiltern

Hochwertig ausgelegte und betriebene Oberflächenfilter besitzen ökonomische und ökologische Vorteile. Aufgrund erhöhter Investitionskosten sind diese dennoch am Markt nur unzureichend verbreitet. Als Instrument zur Zusammenführung ökonomischer und ökologischer Interessen

dient die Betrachtung von Lebenszykluskosten. Dabei werden alle relevanten Kosten durch eine dynamische Investitionskostenrechnung mit Berücksichtigung einer Preissteigerung ermittelt, die über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes verursacht werden [52]. Nach der Anschaffung anfallende Ausgaben z.B. durch Energie- und Instandhaltungskosten werden auf Grundlage eines Zinsfaktors (Diskontsatz) auf den Investitionszeitpunkt auf- oder abgezinst (je nach Rahmenbedingungen des Kapitalmarktes). Die resultierenden Lebenszykluskosten können als Gesamtkosten über den vollständigen Lebenszyklus des Oberflächenfilters (Kapitalwertmethode) oder als laufende Kosten in definierten Zeitspannen von üblicherweise einem Jahr (Annuitätenmethode) abgebildet werden. Ausgerichtet auf den Zweck des Oberflächenfilters müssen dabei objektive Kriterien für einen belastbaren Angebotsvergleich angesetzt werden. Gegenüber der reinen Betrachtung von Investitionskosten findet durch die Betrachtung der Lebenszykluskosten eine ganzheitliche Beurteilung der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen eines Produktes statt. In der Praxis erfolgt dies aktuell kaum, obwohl ökonomische und ökologische Vorteile effizienter Filter deutlich aufgezeigt werden können. Effiziente Oberflächenfilter sind in der Anschaffung zunächst teurer; die Mehrkosten amortisieren sich jedoch infolge erheblich geringerer Betriebskosten i. d. R. rasch. Die zu erwartenden Tendenzen zeigt Bild 32:

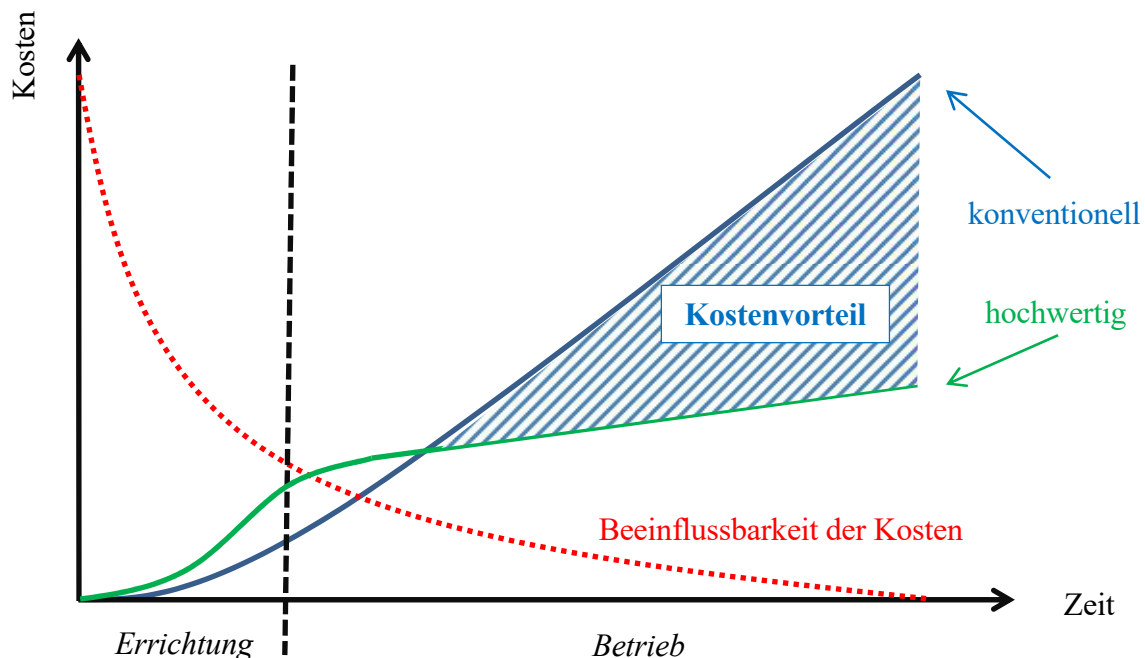


Bild 32: Lebenszykluskosten konventionell und hochwertig errichteter Oberflächenfilter

Aus Bild 32 wird deutlich, dass die Lebenszykluskosten des Oberflächenfilters nach der Errichtung nur noch eingeschränkt beeinflusst werden können, da diese hauptsächlich in der Kalkulations- und Auswahlphase festgelegt werden. Höhere Investitionskosten amortisieren sich durch die geringeren Betriebskosten daher verhältnismäßig schnell, wie der Kostenvorteil zwischen konventioneller und hochwertiger Errichtung zeigt (schraffierte Fläche). Investitionen in hochwertige Technik sind insbesondere bei niedrigem Zinsniveau attraktiv, da Geldanlagen dann wirtschaftlich weniger attraktiv sind als die Einsparung von Betriebskosten, welche in den Folgejahren einer deutlichen Preissteigerung unterworfen sind. Nachfolgend sind alle für die Betrachtung der Lebenszykluskosten von Oberflächenfiltern relevanten Kosten aufgeführt:

- Anschaffungskosten
 - Auslegung, ggfs. Zusatzkosten für Voruntersuchungen zur Absicherung
 - Transport
 - Installation und Inbetriebnahme
- Betriebskosten
 - Strom und Druckluft
 - Austausch Filtermittel
 - Instandhaltung
- Rückbau und Entsorgung

Die Betrachtung von Lebenszykluskosten gliedert sich in den Trend zur nachhaltigen Produktion ein, der auch durch Ökobilanzierung (*Life Cycle Assessment – LCA*) abgebildet werden kann. Es handelt sich dabei auch um eine Möglichkeit, die Umweltauswirkungen von Produkten über den gesamten Lebensweg zu betrachten (*ökologischer Fußabdruck*). Als Leitfaden zur Ökobilanzierung existiert der internationale Standard *ISO 14044*. Die angestrebte Transformation der Wirtschaft in Richtung Nachhaltigkeit birgt dabei oft einen scheinbaren Zielkonflikt zwischen ökonomischen und ökologischen Interessen. Nach [53] entscheiden Unternehmen oft individuell entsprechend ihrer jeweiligen Ressourcen, womit nachhaltige Entwicklungen z. T. behindert werden. Die Sensibilisierung der Verbraucher zum bevorzugten Erwerb ökologischer Produkte trägt entscheidend zur Förderung nachhaltiger Entwicklungen bei.

Die ganzheitliche Betrachtung auf Basis der Lebenszykluskosten allein führt noch nicht zur Etablierung effizienter Oberflächenfilter. Entscheidend für die Umsetzung ist es, diesen Ansatz für die Zielgruppen Errichter und Betreiber leicht verfügbar zu machen. Hierfür bietet die Digitalisierung der Wirtschaft und Gesellschaft neuartige Möglichkeiten, die Auslegung von Ober-

flächenfiltern transparenter im Sinne der Lebenszykluskosten zu gestalten. Virtuelle Produktkonfiguratoren können entscheidend dazu beitragen, komplexe Zusammenhänge anschaulich abzubilden und dadurch allen interessierten Parteien leicht zugänglich zu machen. Das Angebotsspektrum eines Anlagenerrichters fließt darin vollständig ein und kann bei Bedarf um externe Dienstleistungen ergänzt werden. Dies betrifft u. a. die Absicherung der Anlagenauslegung sowie die Auswahl effizienzrelevanter Baugruppen, deren Eigenschaften im Produktkonfigurator hinterlegt werden. Nach Eingabe wesentlicher Anforderungen an den Oberflächenflächenfilter durch den Kunden (z.B. zu reinigender Volumenstrom, Jahresbetriebsstunden) werden daraus Investitions-, Instandhaltungs- und Energiekosten automatisch berechnet und zu Lebenszykluskosten weiterverarbeitet. Mit wenig Aufwand wird dadurch eine ganzheitliche Betrachtung ermöglicht und Transparenz geschaffen. Für Unternehmen, die einen derartigen Service bereitstellen, bieten sich damit entscheidende Wettbewerbsvorteile. Insbesondere der Angebots- und Entwicklungsprozess kann dabei erheblich beschleunigt werden, wodurch auch Kosten eingespart werden. Stark gestiegenen Kundenerwartungen an individualisierte Produkte (ab Losgröße 1) zu Konditionen einer Serienfertigung wird damit zunehmend Rechnung getragen. Der Kunde übernimmt die Rolle eines aktiv handelnden Akteurs, der leichter nachhaltige Entscheidungen treffen kann, ohne detaillierte wissenschaftliche Zusammenhänge kennen zu müssen.

Wichtige Eigenschaften eines Produktkonfigurators sind eine qualitativ hochwertige Visualisierung und eine intuitiv einfach bedienbare Benutzeroberfläche, um die Botschaft klar zu transportieren. Die effiziente Nutzbarkeit des Konfigurators auf mobilen Endgeräten (z.B. Smartphone, Tablet) durch die Bereitstellung einer Anwendungssoftware (*App*) ermöglicht zusätzlich die orts- und zeitunabhängige Konfiguration eines Filters. Zu wesentlichen Entscheidungen, die der spätere Betreiber zu treffen hat, sind spezifische Vor- und Nachteile hinterlegt. Dazu sind technische, ökologische und ökonomische Aspekte quantitativ abzubilden. Bild 33 verdeutlicht das Konzept eines Produktkonfigurators exemplarisch anhand der Auswahl des Ventilators für einen Oberflächenfilter. Die zu konzipierende Anlage ist dabei schematisch abgebildet; das aktuell betrachtete Detail (Ventilator) wird vergrößert. Oben links im Bild werden wesentliche Anforderungen an den Ventilator abgefragt. Bei gelb hinterlegten Feldern ist eine Eingabe erforderlich. Die erforderliche Größe des Ventilators ist in vier Ausführungen verfügbar. Neben der Standardausführung als Referenz werden energieeffiziente Alternativen aufgeführt, zu deren höheren Investitionskosten eine Amortisationszeit angegeben werden kann. Die getroffene Auswahl des Elektromotors (IE3) ermöglicht zusätzlich die Inanspruchnahme von Subventionen, auf dessen Antragsunterlagen verwiesen wird.

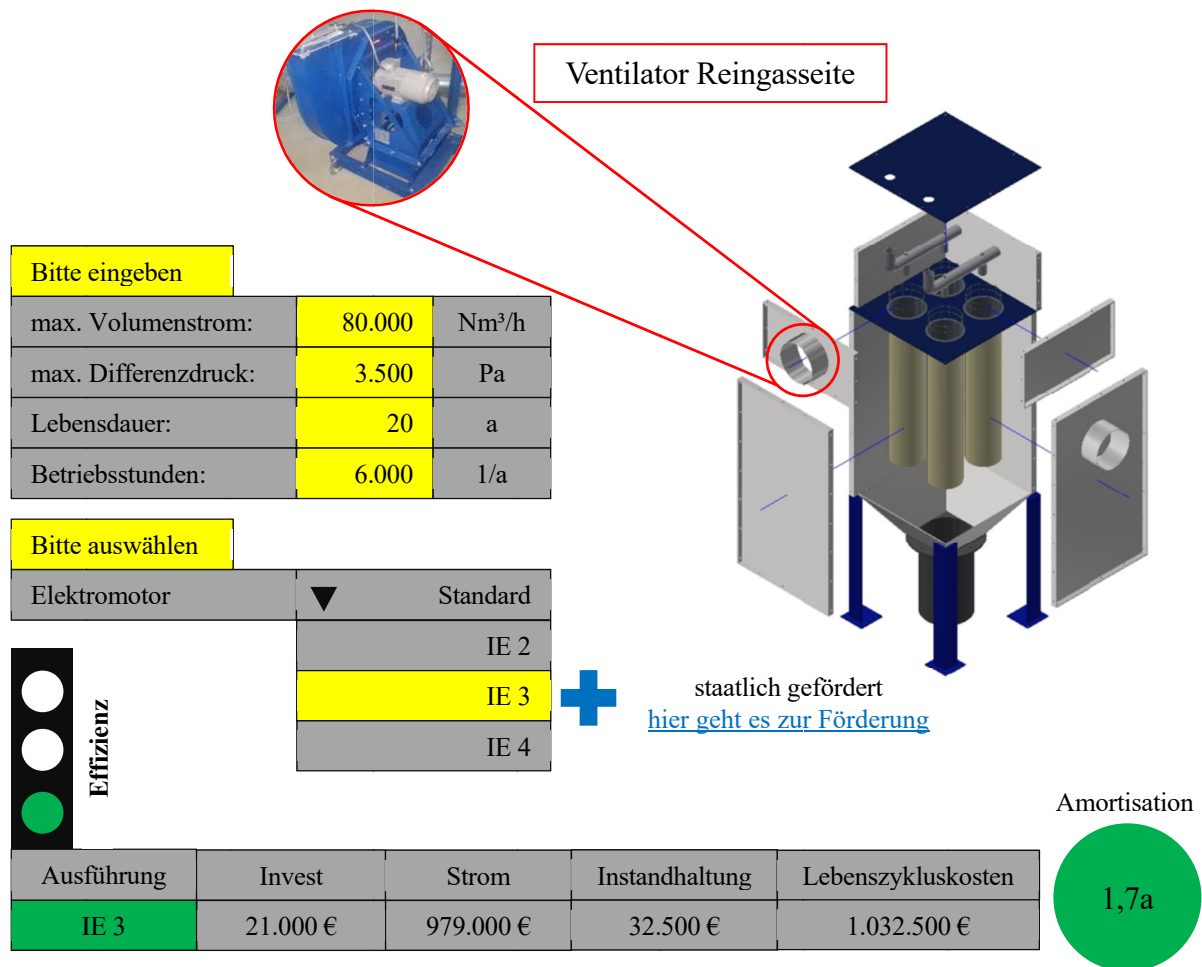


Bild 33: Benutzeroberfläche eines Produktkonfigurators für Oberflächenfilter am Beispiel der Ventilatorauswahl

4.2 Absicherung der Anlagenauslegung

Die Auslegung des Oberflächenfilters ist aus Sicht der Lebenszykluskosten entscheidend für die Effizienz der Filteranlage. Anhaltspunkte zur gängigen Praxis der Auslegung, Inbetriebnahme und Instandhaltung von Oberflächenfiltern können einschlägigen VDI-Richtlinien entnommen werden [54, 55]. Zur Absicherung der Anlagenauslegung stehen verschiedene methodische Ansätze zur Verfügung, welche als optionale Dienstleistung mit in den Produktkonfigurator aufgenommen werden können. Diese werden in Tabelle 2 gegenübergestellt und anschließend diskutiert. Die Konstruktion und Prozessführung können dadurch entscheidend optimiert werden. Damit verbundene zusätzliche Kosten reduzieren das Risiko fehlerhafter Auslegung erheblich und amortisieren sich i. d. R. verhältnismäßig schnell.

Tabelle 2: Methodische Ansätze zur Absicherung der Anlagenauslegung

Aspekt	Beispiele	Einfluss auf...
Nutzung empirisch gewonnener Erkenntnisse	spezifische Erfahrungswerte	Konstruktion Prozessführung
experimentelle Absicherung der Anlagenauslegung	Laboruntersuchungen	Konstruktion Prozessführung
	Technikumsversuche	
	Bilanzierung zirkulierender Staubanteile	
Messgeräte	Roh-/Reingasstaubkonzentration	Prozessführung
	Messung Abscheidegrade	
simulative Absicherung der Anlagenauslegung	reine Fluidströmung	Konstruktion Prozessführung
	Mehrphasenströmungen	
	Druckverlustberechnung	

4.2.1 Nutzung empirisch gewonnener Erkenntnisse

Gute Orientierungswerte zur Wahl der Filterflächenbelastung wurden auf Basis empirisch gewonnener und tabellarisch verfügbarer Daten erarbeitet [19 pp. 246–252]. Je nach Anwendungsfall werden dabei Grundwerte für die Filterflächenbelastung empfohlen. Entsprechend Bild 34 wird dieser Grundwert A mit verschiedenen Faktoren multipliziert, woraus die effektiv zu wählende Filterflächenbelastung ermittelt wird.

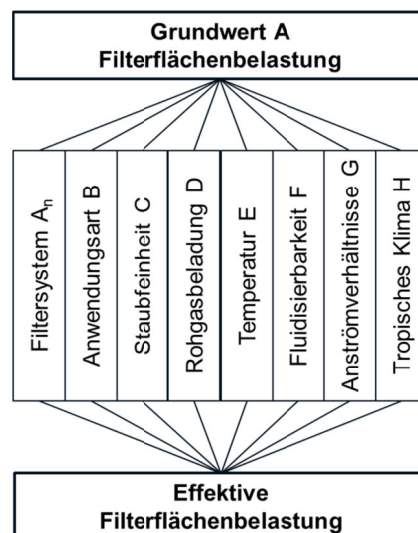


Bild 34: Dimensionierung der Filterfläche nach [19 pp. 246–252]

Der Faktor A_n bezieht sich auf die Art der Filtermittelregenerierung und entspricht bei druckluftgepulsten Schlauchfiltern dem Faktor 1. Bei dem Faktor B wird zwischen einfachen Anwendungen (z.B. Absaugung an Übergabestellen, Faktor 1), Produktrückgewinnung (Faktor 0,9) und Prozessgasfiltration (Faktor 0,8) unterschieden. Aus dem Unterschied zwischen einer Staubfeinheit (Faktor C) von 2–5 μm und 10–50 μm resultiert eine notwendige Reduzierung der effektiven Filterflächenbelastung um ca. 20 %. Mit zunehmender Rohgasstaubkonzentration (Faktor D) und Prozesstemperatur (Faktor E) ist eine Verringerung der Filterflächenbelastung notwendig. Das Agglomerationsverhalten verdeutlicht Faktor F (Fluidisierbarkeit) mit der Schüttdichte als Indikator. Eine Verringerung der Schüttdichte von 0,6 g/cm^3 auf $< 0,2 \text{ g}/\text{cm}^3$ führt zu einer um 20 % niedrigeren Filterflächenbelastung. Auf die Problematik spezifisch leichter, schlecht agglomerierender Stäube wird analog zu Kapitel 2.5.2 hingewiesen. Hierbei wird ein klarer Bezug zu zirkulierenden Staubanteilen hergestellt, welche zum Zusammenbruch des Oberflächenfiltrationsprozesses führen können, indem keine ausreichende Ausschleusung abgereinigter Stäube mehr erfolgt. Der Faktor G berücksichtigt Strömungsführung im Rohgasraum. Eine aufwärts gerichtete Strömung on-line-regenerierter Oberflächenfilter zieht eine signifikante Reduzierung der Filterflächenbelastung nach sich. Auch eine hohe Luftfeuchtigkeit (Faktor H) reduziert die effektive Filterflächenbelastung.

Dieser Ansatz hilft, eine orientierende Abschätzung möglicher Filterflächenbelastungen für den jeweiligen Anwendungsfall abzuschätzen. Da auf Grundlage empirisch gewonnener Erfahrungswerte gerechnet wird, besitzt diese Methodik einen halbquantitativen Charakter. Die Voraussetzung dafür sind vorliegende Grundwerte für den entsprechenden Einzelfall. Diese sind jedoch selten mit den zu konzipierenden Anlagen direkt vergleichbar. Eine Marktrecherche sowie der Erfahrungsaustausch hinsichtlich Referenzanlagen für vergleichbare Anwendungen können hierbei gute Ansätze zur Festlegung einer geeigneten Filterflächenbelastung liefern. Grundsätzlich verbessert sich die Effizienz bei Verringerung der Filterflächenbelastung zu Lasten eines spezifisch größeren Filters. Aufgrund höherer Investitionskosten oder begrenzt zur Verfügung stehenden Platzes werden spezifisch größere Filteranlagen trotz tendenziell geringerer Lebenszykluskosten jedoch selten errichtet.

Speziell unter dem Aspekt zirkulierender Staubanteile, welche über den Druckverlust einen wesentlichen Einfluss auf die Energieeffizienz der Oberflächenfiltration haben, werden nachfolgend Reduzierungsmaßnahmen empfohlen. Eine off-line-Regenerierung der Filtermittel wird oft als wirksames Mittel zur Reduzierung zirkulierender Staubanteile angeführt [20 p. 252, 19 p. 223, 19 pp. 239–241, 29 p. 180, 56]. Bei Mehrkammerfiltern können einzelne Kammern nach-

einander in einen strömungsfreien Zustand versetzt und off-line-regeneriert werden. Das *Energy Minimizing Concept* (EMC) ermöglicht eine gegengleiche Steuerung der off-line-Regenerierung einzelner Kammern [57]. Der Fokus liegt auf einer stets konstanten verfügbaren Filterfläche, welche zu einem konstanten Differenzdruck der Gesamtanlage führt. Vereinzelt werden möglichst geringe Abreinigungsdrücke empfohlen [27 p. 57].

Wechselwirkungen speziell mit benachbarten Filterelementen (ZSA_B) werden nach [58] für Patronenfilter beschrieben. Als Lösung wird ein individuell positionierbarer Behälter beschrieben, der über die Filterpatronen gefahren werden kann, womit die Beeinflussung benachbarter Filterelemente durch abgereinigte Stäube verhindert werden soll. Der Behälter wird aktiv abgesaugt. Auch wenn diese Lösung als wenig praktikabel erscheint, können zirkulierende Staubanteile mit diesem Lösungsansatz sicher vermieden werden.

Eine gezielte Reduzierung der Aufströmgeschwindigkeit zwischen den Filterelementen wird am Beispiel eines Patronenfilters entsprechend Bild 35 beschrieben [59]. Senkrecht angeordnete, konische Filterelemente mit Verjüngung nach unten zeichnen sich durch eine größere freie Querschnittsfläche aus, welche geringere Strömungsgeschwindigkeiten im unteren Teil der Filterelemente ermöglicht. Nach Herstellerangaben ist ein bis zu 30 % größerer Volumenstrom möglich, der durch Reduzierung zirkulierender Staubanteile ermöglicht wird. Dieser Effekt wirkt sich positiv auf Wechselwirkungen mit dem regenerierten Filterelement aus (ZSA_A).



Bild 35: Konische Filterelemente mit reduzierter Aufströmgeschwindigkeit durch größere freie Querschnittsfläche im unteren Bereich zwischen den Filterelementen [59]

Patronenfilter mit horizontal angeordneten Filterelementen werden teilweise mit im Querschnitt von der runden Form abweichenden Geometrien gefertigt [60], wie Bild 36 demonstriert. Der Vorteil gegenüber runden Ausführungen basiert auf einer größeren Filterfläche an der Unterseite der Patronen (27 % anstatt 25 %). Das Problem der Staubablagerung unter Schwerkraftwirkung an der Oberseite der Patronen (zirkulierende Staubanteile) wird dadurch jedoch nur minimal verringert. Durch Bild 35 und Bild 36 wird anhand der Filterelementform aufgezeigt, dass noch immer erhebliche Potenziale existieren, die Effizienz von Oberflächenfiltern zu erhöhen. Wenn- gleich schwerer zu fertigen, sollte diese Form auch auf Taschenfilter übertragen werden.

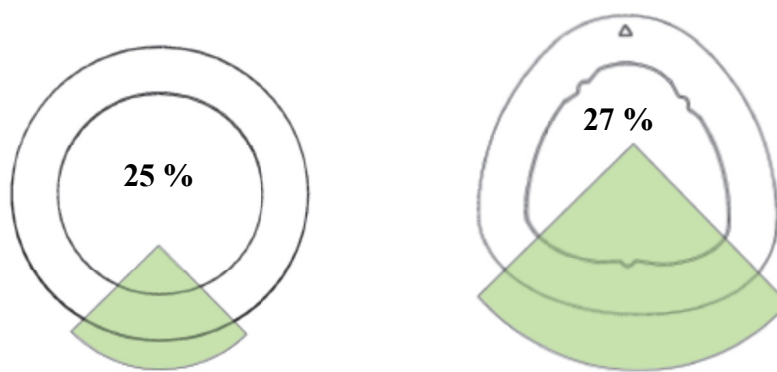


Bild 36: Vergleich unterschiedlicher Filterelementquerschnitte bei Patronenfiltern [60]

Vereinzel werden auch Zwischengassenabreinigungen eingesetzt. Dabei werden auf der Rohgasseite zwischen den Filterelementen Abreinigungsdüsen analog zur Abreinigung der Filterelemente verwendet, wodurch die Sedimentation abgereinigter Stäube beschleunigt wird. Speziell bei eingeschränkten Platzverhältnissen ist dieser Ansatz erfolgversprechend, falls keine größeren Gassenabstände umgesetzt werden können.

Zur Unterstützung einer abwärts gerichteten Strömung sowie zur Vermeidung zirkulierender Staubanteile werden nach [61] anstatt eines einzelnen Druckluftstoßes zur Filtermittelregenerierung mehrere kurz hintereinander stattfindende Druckluftstöße (Druckgas-Impulsgruppe) ausgelöst. Die Regenerierung der Filterelemente erfolgt bei dieser Anwendung zur Filtration von Siliziumdioxid reihenweise. Ohne die Nutzung der Druckgas-Impulsgruppe würde eine erhöhte Energieaufnahme des Lüfters stattfinden, was auch die Errichtung eines größeren Filters erforderlich macht. Verhältnismäßig hohe Betriebs- und Investitionskosten für die Entstaubungsanlage wären direkte Folgen. Der Erfolg der Druckgas-Impulsgruppe wird bei dieser Anwendung mit einem um 50 % geringeren Restdruckverlust bei konstanten Druckluftkosten angegeben.

Die dargestellten empirischen Erkenntnisse sollten bei der Auslegung effizienter Oberflächenfilter berücksichtigt werden, ersetzen jedoch keine quantitative Datengrundlage. Für den jeweiligen Anwendungsfall ist die Wirksamkeit zu beurteilen.

4.2.2 Experimentelle Absicherung der Anlagenauslegung

Labor- und Technikumsuntersuchungen

Eine objektive Datengrundlage für die Auslegung von Oberflächenfiltern können experimentelle Untersuchungen des Filtrationsverhaltens an einem Filterprüfstand in Anlehnung an DIN ISO 11057 [62] liefern, der bereits in Kapitel 3.4.3 beschrieben wurde. Diese standardisierte Apparatur kommt zur Charakterisierung des Filtrationsverhaltens abreinigbarer Filtermedien bereits in der Wissenschaft und bei einigen Filteranlagenerrichtern zum Einsatz. Vergleichende Untersuchungen anhand realer Stäube und Filtermittel unter der Praxis nachempfundenen Prozessbedingungen sind damit möglich. Zur praxisnahen Erprobung können auch Oberflächenfilter im Technikumsmaßstab genutzt werden. Ein Beispiel hierfür wurde bereits in Kapitel 3.4.4 vorgestellt. Entscheidend für die praxisnahe Durchführung, Auswertung und Interpretation der Untersuchungen ist der Versuchsaufbau. Ein geeignetes Konzept hierfür, mit dem auch die Bilanzierung des Prozesses entsprechend Kapitel 2.6 möglich ist, wird anhand Bild 37 erläutert.

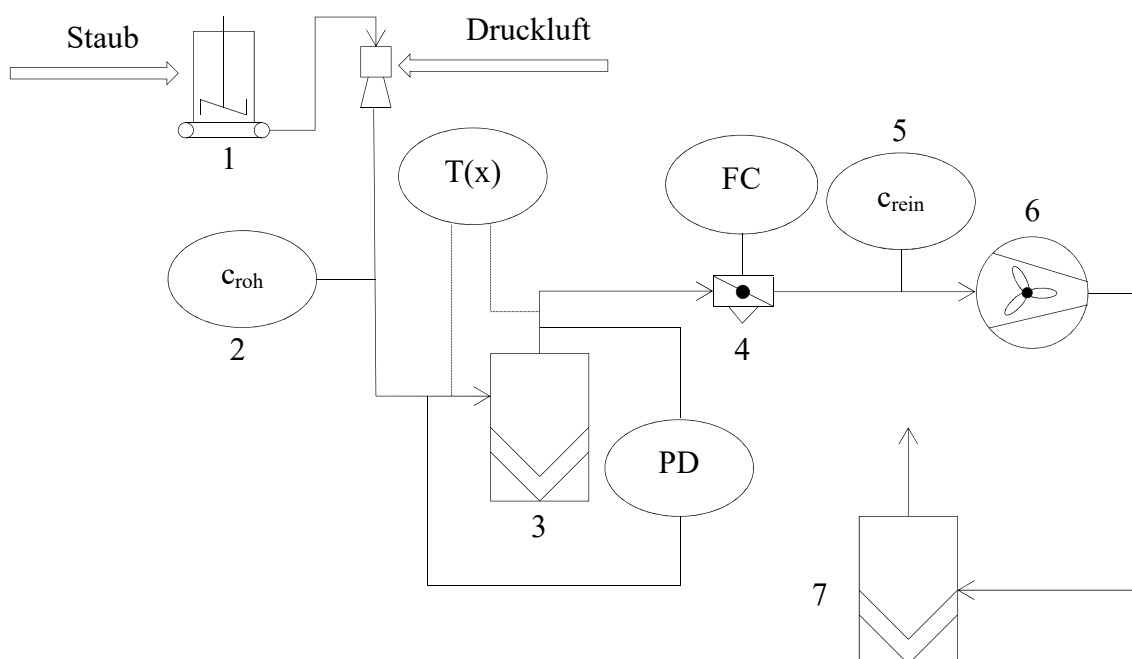


Bild 37: Versuchsaufbau zur Bilanzierung von Oberflächenfiltrationsprozessen

Das Rohgas wird in den Rohgaskanal dosiert (1), dessen Staubkonzentration erfasst wird (2). Der zu untersuchende Filter (3) wird reingasseitig über einen Lüfter (6) abgesaugt. Der Volumenstrom wird geregelt (4); die Reingasstaubkonzentration (5) gemessen. Alle Leitungen müssen abgedichtet sein. Vor Abgabe an die Umgebung wird das Reingas über einen Polzeifilter als Sicherheitsfilter für den Havariefall geleitet (7). Eine Steuerung ermöglicht die automatisierte Messwerterfassung mit einer Abtastezeit von 1 Hz, um zeitabhängige Prozesszustände möglichst genau zu erfassen.

Für die Versuche liegen die zu untersuchenden Stäube oft nur in Pulverform vor und müssen daher dosiert und dispergiert werden. Dies ist mit einem volumetrisch arbeitenden Bürstendispergierer BEG 1000 Typ B der Fa. Palas GmbH (Bild 38) möglich. Anhand dieser Technik, die auch im Rahmen eigener Untersuchungen zum Einsatz kam, werden die Probleme der Rohgasherstellung erläutert. Diese sind speziell für vergleichende Untersuchungen wichtig, da durch die Dosierung und Dispergierung der Stäube erheblicher Einfluss auf die Staubeigenschaften und damit auch das Filtrationsverhalten genommen wird.

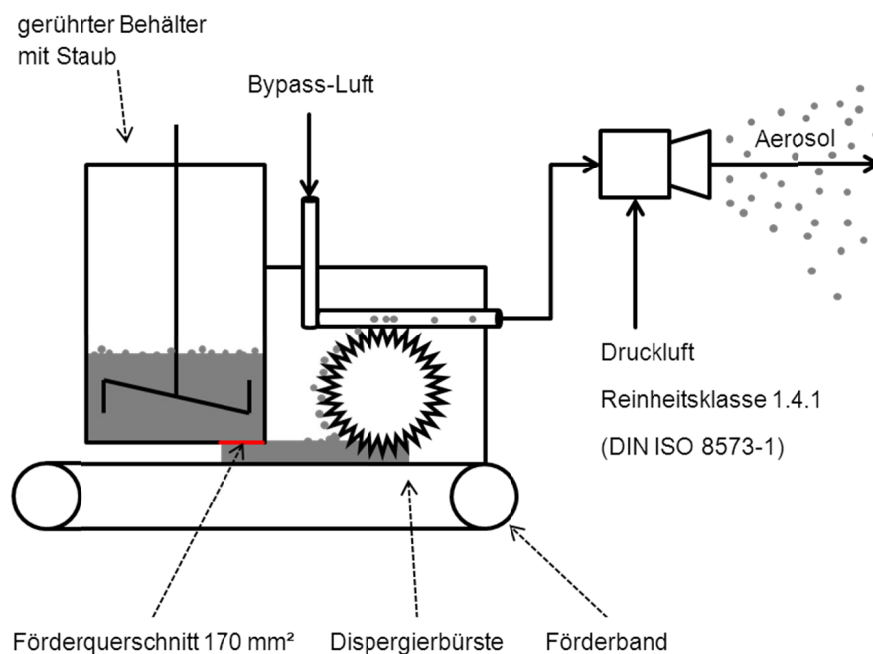


Bild 38: Bürstendispergierer BEG 1000 Typ B (Fa. Palas)

Als mechanischer Trockendispergierer nutzt dieser seine vorgespannten Borsten zur Dispergierung, indem ihre Energie nach schlagartiger Entlastung freigegeben wird. Je nach Staubeigenschaften ermöglicht dies eine Dispergierung von Partikeln etwa ab einer Größe von ca. 1 µm.

Die Energie der Borsten wird zum Zerschlagen der Agglomerate (Dispergierung) und zu deren Beschleunigung genutzt. Dabei werden elektrostatische Ladungen erzeugt, die das Agglomerationsverhalten der Staubpartikel beeinflussen. Der Staub wird in einem gerührten Behälter vorgelegt und über ein Förderband einer rotierenden Bürste zugeführt. Durch eine Venturidüse wird der aufgewirbelte Staub angesaugt und als Rohgas in den jeweiligen Prüfstand geleitet. Nach Herstellerangaben beträgt die maximal verwendbare Partikelgröße 200 μm [63]. Die Dosierleistung \dot{m}_D ergibt sich nach Formel (34) aus der Bandgeschwindigkeit v_B , den über den Bypass einstellbaren Druckverhältnissen, der Schüttdichte des Staubs ρ_S und einem anlagenspezifischen Förderquerschnitt A_D . Weiterhin beeinflussen der Dispergierdruck p_D sowie die Staubeigenen Menge und Partikelgrößenverteilung des dispergierten Staubs.

$$\dot{m}_D = A_D \cdot v_B \cdot \rho_S \quad (34)$$

Mit zunehmenden Haftkräften zwischen den Partikeln, gleichbedeutend mit hoher Agglomerationsneigung und geringer Fließfähigkeit, wird die Dispergierung des Staubs erschwert. Bild 39 zeigt Partikelgrößenverteilungen unterschiedlicher Stäube, die vergleichbar dosiert und dispergiert wurden. Alle Stäube sind verhältnismäßig fein. Der Staub Calcit MS12 weist dabei eine gröbere Partikelgrößenverteilung als die Stäube Pural SB und Flugasche auf, welche über eine vergleichbare Körnung verfügen.

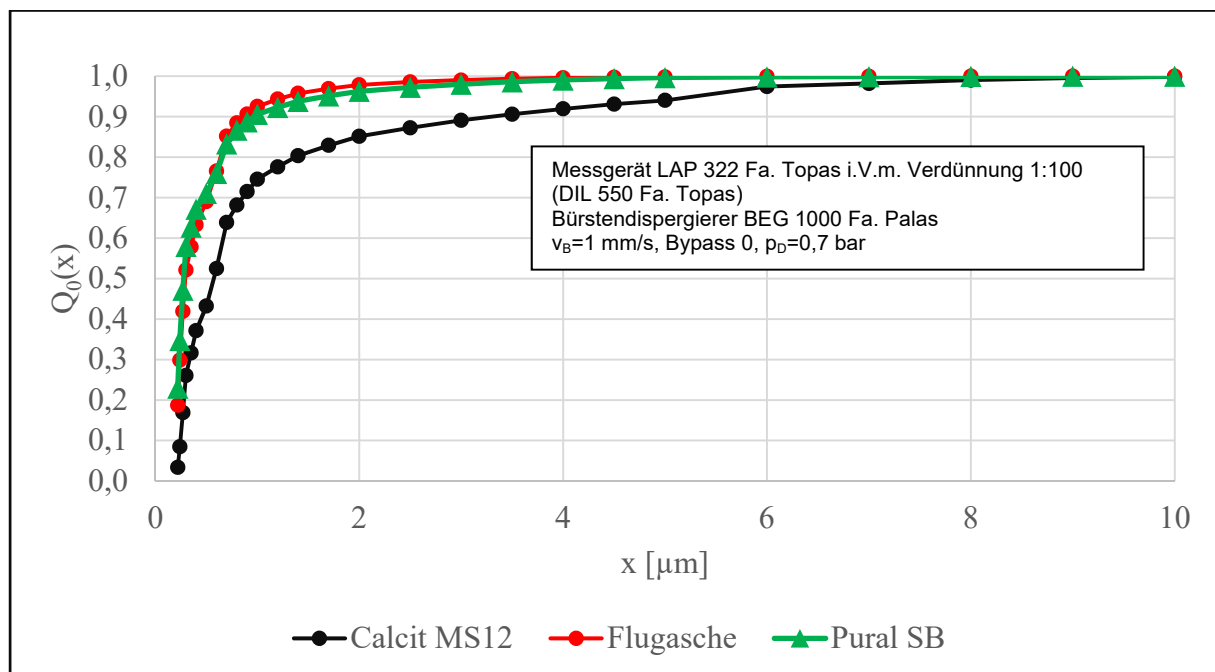


Bild 39: Partikelgrößenverteilungen ausgewählter Rohgase

Aufgrund der hohen Anteile $< 1\mu\text{m}$ ist davon auszugehen, dass eine erhebliche Partikelanzahl sich im Partikelgrößenbereich der mpps befindet, was diese Stäube zu einer anspruchsvollen Filtrationsaufgabe machen könnte. Speziell mit den gut fließfähigen Stäuben Pural SB und Flugasche sind Probleme zu erwarten, da diese bei Filtermittelregenerierung verstärkt redispergieren und damit zirkulierende Staubanteile begünstigen.

Vergleichende Untersuchungen unter Labor- oder Technikumsbedingungen sollten mit identischen Staubchargen und einheitlicher Dosierung sowie Dispergierung des Staubs stattfinden, um die resultierenden Partikelgrößenverteilungen nicht zu beeinflussen. Insofern möglich sollten vergleichbare klimatische Bedingungen vorliegen. Damit können störende Einflüsse auf diesen schwer kontrollierbaren Prozesses weitestgehend ausgeschlossen werden. Falls realisierbar könnte der Versuchsaufbau auch im industriellen Umfeld eingesetzt werden, womit reales Rohgas z. B. über einen Bypass untersucht werden könnte. Auch wenn damit ein erheblicher Aufwand verbunden ist, führt dies zu realistischen Ergebnissen.

Berücksichtigung zirkulierender Staubanteile

Das aus Kapitel 3 gewonnene Prozessverständnis zu zirkulierenden Staubanteilen kann zur Effizienzsteigerung von Oberflächenfiltern genutzt werden. Durch die geschaffene Methodik zur Bilanzierung zirkulierender Staubanteile besteht nun die Möglichkeit, den Einfluss bestimmter Konstruktions- und Prozessparameter energetisch zu quantifizieren, was als Voraussetzung für eine gezielte Optimierung dient. Damit wird eine hochwertige Auslegung effizienter Oberflächenfilter mit Berücksichtigung zirkulierender Staubanteile möglich.

Alternativ zur quantitativen Bilanzierung zirkulierender Staubanteile mit der entwickelten Methodik (siehe Kapitel 3.4) wird ein halbquantitativer Ansatz vorgestellt, der auf einer Checkliste entsprechend Bild 40 basiert. Der Vorteil dieses Ansatzes ist die Möglichkeit zur schnellen Abschätzung des Einflusses zirkulierender Staubanteile auf Grundlage spezifischer Erfahrungswerte. Dazu werden die Eigenschaften eines nach Einschätzung des Anlagenerrichters effizienten Oberflächenfilters (Referenz) anhand einer Bewertungsmatrix mit der geplanten Anwendung verglichen und in Form eines Performance-Wertes bewertet. Als Performance ist die Eignung der Anwendung hinsichtlich Minimierung zirkulierender Staubanteile zu verstehen. Je höher der Performance-Wert ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit störender Einflüsse auf den Oberflächenfiltrationsprozess aufgrund zirkulierender Staubanteile.

Das Vorgehen gliedert sich in drei Schritte. Zunächst werden entsprechende Informationen zur konkreten Anwendung im Kontext konstruktiver und prozesstechnischer Parameter gesammelt (Schritt 1). Im zweiten Schritt erfolgt ein qualitativer Vergleich der einzelnen Parameter. Dabei wird anhand der Tabelle abgeschätzt, wie sich die Unterschiede auf zirkulierende Staubanteile auswirken. Im Schritt 3 wird die Performance der zu konzipierenden Anwendung im Vergleich zur Referenzanwendung beurteilt.

1. Sammlung von Informationen		2. Vergleich mit Referenz		3. Beurteilung der Performance (Referenz = 0)					
Einfluss		Wirkung negativ → positiv		Performance					
				negativ		+/-	positiv		Wert
Rohgasstaubkonzentration		höher	→ geringer		-1	×	+1		0
Strömungsführung		diffus	→ top-down	-2	-1	0	×	+2	+1
Filterflächenbelastung		höher	→ geringer	-3	-2	-1	0	+1	+2
Staubeigenschaften		frei fließend	→ gut agglom.	-3	×	-1	0	+1	+2
Filtermittelregenerierung		on-line	→ off-line	-3	-2	-1	×	+1	+2
Gassenabstand		geringer	→ höher	-3	-2	×	0	+1	+2
Filtermittel		rauh	→ Membran		-2	-1	0	+1	×
Sonstiges			→						
Summe									+2

Performance-Wert

↗

Bild 40: Halbquantitativer Ansatz zur Berücksichtigung zirkulierender Staubanteile bei der Errichtung von Oberflächenfiltern (exemplarisch ausgefüllt), Checkliste siehe Anhang 9

Die Konzeption der Checkliste wurde maßgeblich durch Gewichtung wesentlicher Einflussfaktoren auf zirkulierende Staubanteile entsprechend Kapitel 3.2 sowie spezifischer Erfahrungswerte von Anlagenerrichtern beeinflusst und stellt einen konzeptionellen Ansatz dar. Auf Grundlage spezifischer Erfahrungswerte unterschiedlicher Errichter von Entstaubungsanlagen kann eine individuelle Anpassung dieser Checkliste sinnvoll sein. Gleiches gilt für Tabelle 3, die Empfehlungen zur Interpretation des Performance-Wertes enthält, welcher sich aus der Summe der Einzelwerte ergibt. Die zu beurteilende Filtrationsanwendung sollte im Vergleich zur etablierten Referenzanwendung möglichst gleichwertig oder besser sein, um einen aus Sicht zirkulierender Staubanteile stabilen Anlagenbetrieb zu gewährleisten.

Tabelle 3: Interpretation des Performance-Wertes

Performance-Wert	Bewertung
≤ -2	Auslegung mit Nachteilen gegenüber Referenzanwendung
$-2 < x \leq 1$	Auslegung vergleichbar zu Referenzanwendung
≥ 2	Auslegung mit Vorteilen gegenüber Referenzanwendung

Im vorliegenden Beispiel mit einem Performance-Wert von +2 für die zu errichtende Anlage ist davon auszugehen, dass diese sich hinsichtlich zirkulierender Staubanteile gegenüber der Referenzanwendung zumindest gleichwertig verhält bzw. Vorteile aufweist. Die negativen Einflüsse des stärker fließfähigen Staubs sowie des etwas geringeren Gassenabstands konnten durch die positiven Effekte einer erheblichen Verringerung der Filterflächenbelastung sowie der Verwendung eines Membranfiltermediums ausgeglichen werden. Aufgrund der jeweiligen Rahmenbedingungen wie z.B. eingeschränkter Platzverhältnisse lässt sich ein neutraler oder positiver Performance-Wert z. T. nur schwer realisieren. Oft führt dies zu einer Kompromisslösung mit entsprechenden Leistungs- und Effizienzeinbußen. In diesem Fall sollten Ersatzmaßnahmen ergriffen werden, um Defizite auszugleichen. Ausgewählte Ersatzmaßnahmen, die in der Checkliste unter „Sonstiges“ ergänzt werden können, werden nachfolgend genannt und beurteilt:

- Zwischengassenabreinigung
- Beruhigungszonen
- mehrstufige Prozessführung

Die Zwischengassenabreinigung kann speziell bei zu hohen Filterflächenbelastungen zur Prozessstabilität beitragen. Damit kann der Staubaustrag auch schlecht agglomerierender Stäube und verhältnismäßig langer Filterelemente erheblich verbessert werden. Die Wirtschaftlichkeit dieser Ersatzmaßnahmen verringert sich durch zusätzliche Investitions- und Druckluftkosten. Eine Entlastung der Filterfläche durch zuvor sedimentierte Stäube stellt, falls möglich, einen aktiven Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz von Filtern dar. Beruhigungszonen seitens der Rohgaszuführung mit geringer Strömungsgeschwindigkeit sind dabei konstruktiv einfach und kostengünstig zu realisieren und könnten insbesondere bei Austausch oder Modernisierung von Filteranlagen realisiert werden. Ist keine der genannten Ersatzmaßnahmen umsetzbar, sollte eine mehrstufige Prozessführung in Betracht gezogen werden. Aerozyklone als Vorabscheider oder ein zusätzlicher Filter sind möglich, jedoch energetisch nicht zu vertreten.

Staubkonzentrationsmessung auf Roh- und Reingasseite

Die Erfassung der Roh- und Reingasstaubkonzentrationen ist zur Bilanzierung der Entstaubungsprozesse notwendig. Bedingt durch die bei der Oberflächenfiltration üblichen großen Konzentrationsunterschiede zwischen Roh- und Reingasseite ist die Anwendung unterschiedlicher Messprinzipien notwendig. Auf der Rohgasseite wird ein nach dem Prinzip der Transmission arbeitendes Messgerät eingesetzt (Bild 41). Dabei wird die Lichtschwächung einer LED (Wellenlänge 450–700 nm) beim Durchgang durch das Rohgas erfasst [64]. Die Transmission ergibt sich nach dem Lambert-Beer'schem Gesetz aus dem Verhältnis von eingehendem (gelber Pfeil Bild 41) und ausgehendem Licht (roter Pfeil Bild 41).

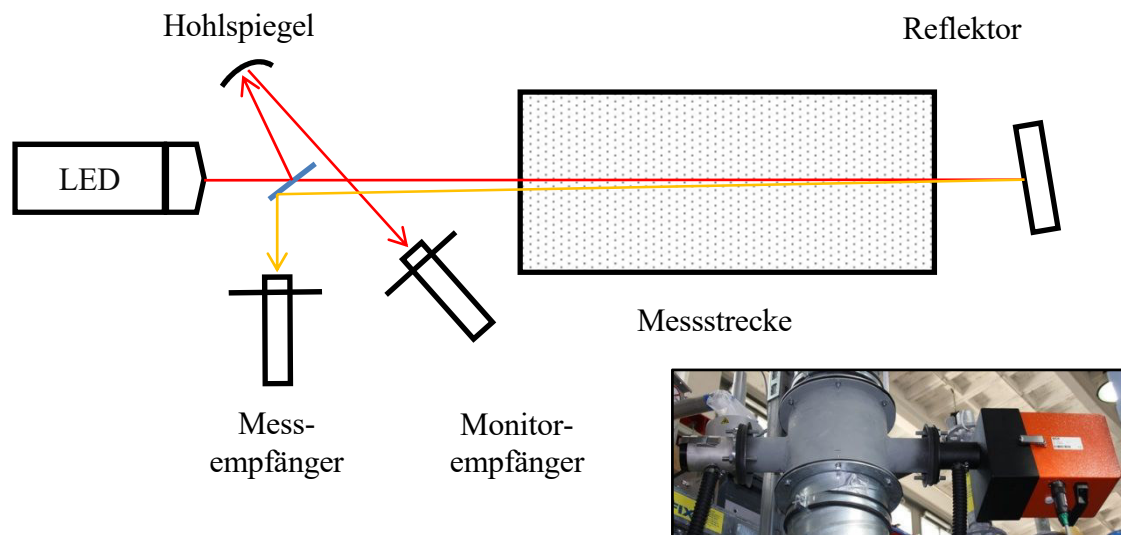


Bild 41: Prinzip Rohgasstaubkonzentrationsmessung nach dem Prinzip der Transmission, Gerät Dusthunter T50 (Fa. Sick), Einbauzustand im Bild unten rechts

Das Messsignal muss dabei entsprechend der eingesetzten Stäube und Prozessbedingungen stets individuell kalibriert werden. Ausschließlich unter diesen Bedingungen ist eine zuverlässige Messung der Rohgasstaubkonzentration möglich. Jede Prozessänderung mit Auswirkung auf die Staubeigenschaften erfordert prinzipiell eine neue Kalibrierung. Diese kann nach VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 (Gravimetrische Bestimmung der Staubeladung) erfolgen. Dabei wird ein Teilstrom des Rohgases mittels einer Sonde isokinetisch entnommen und filtriert. Der erfasste Staub liefert einen Rückschluss auf die reale Rohgasstaubkonzentration. Selbst wenn industrielle Entstaubungsanlagen über eine Rohgasstaubkonzentrationsmessung verfügen, sind

diese jedoch oft nur unzureichend kalibriert und liefern damit keine belastbaren Prozessdaten. In erster Annäherung kann die durchschnittliche Rohgasstaubkonzentration in Anlehnung an Formel (23) auch aus dem Verhältnis der verarbeiteten bzw. zu entsorgenden Staubmenge und dem filtrierten Volumenstrom abgeschätzt werden.

Auf der Reingasseite werden zur Messung der Staubkonzentration z. B. Streulichtfotometer verwendet. Im erläuterten Beispiel entsprechend Bild 42 wird die Streuung einer Lichtquelle der Wellenlänge 880 nm in Vorwärtsrichtung bei einem Streuwinkel von 70 Grad gemessen. Das Gerät kann in den Messbereichen 0–2 bzw. 0–20 mg/m³ betrieben werden. Es ist auf ein DEHS-Tropfenaerosol (Partikelgröße 1 µm) kalibriert [65]. Alternativ zur photometrischen Messung können auch triboelektrische Verfahren zur Messung der Staubkonzentration auf der Reingasseite genutzt werden. Dabei werden Partikelkollisionen mit einer in den Kanal hineinragenden Sonde erfasst. Die damit verbundenen elektrischen Ströme können ins Verhältnis zur Staubkonzentration gesetzt werden. Auch hierbei ist für eine korrekte Messung der Reingasstaubkonzentration eine Kalibrierung des Messgerätes z.B. durch gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung nach VDI 2066 Blatt 1 erforderlich.



Bild 42: Messaufbau Reingasstaubkonzentrationsmessung, Streulichtphotometer TM-F (Fa. Hund), Einbauzustand links im Bild

Für die Bilanzierung der Staubkonzentrationen auf Roh- und Reingasseite mit kontinuierlich arbeitenden Messgeräten sind systematische Fehler durch mögliche Verschmutzungen oder Schwankungen elektronischer Größen zu beachten. Diese off-set-Werte müssen ausgeglichen oder rechnerisch berücksichtigt werden. Dazu empfiehlt sich eine regelmäßige Überprüfung des Messwertes ohne Anwesenheit von Staub (Nullpunktgleich).

Die Beurteilung eines Aerosols hinsichtlich Feinstaubanteil mit den Kennzahlen PM_{10} , $PM_{2,5}$ und PM_1 wird international zunehmend etabliert. Staubemissionen von Filteranlagen sollten deshalb Aussagen zu diesen Kennzahlen enthalten, was bisher nicht gegeben ist. Auf dem Gebiet der Tiefenfiltration mit Bezug zu raumluftechnischen Anlagen passte sich die neue Norm DIN EN ISO 16890 dieser Nomenklatur bereits an. Anhand von Prüfaerosolen werden dabei mit elektrostatisch entladenen Filtermedien die Fraktionsabscheidegrade ermittelt. Dieses Prinzip kann prinzipiell auf Oberflächenfilter übertragen werden, indem die Staubemissionen gemessen werden. In einem geographisch definierten Raum können Immissionen somit besser den Filteranlagen als Staubemissions- und Schadstoffquelle zugeordnet werden. Die Wirksamkeit von Aktivitäten zur Verringerung von Staubemissionen ließe sich damit einfacher nachweisen.

Messung der Partikelgrößenverteilung auf Roh- und Reingasseite

Zur Berechnung der Fraktionsabscheidegrade als Leistungskennwert sind die Partikelgrößenverteilungen auf Roh- und Reingasseite erforderlich. Messungen der Partikelgrößenverteilungen dispergierter Stäube sind mit optischen Aerosolspektrometern möglich. Das Messprinzip basiert dabei auf der Erfassung der Streuung eines Lichtstrahls der Intensität I_0 und Wellenlänge λ an Partikeln (66 p. 8, Bild 43).

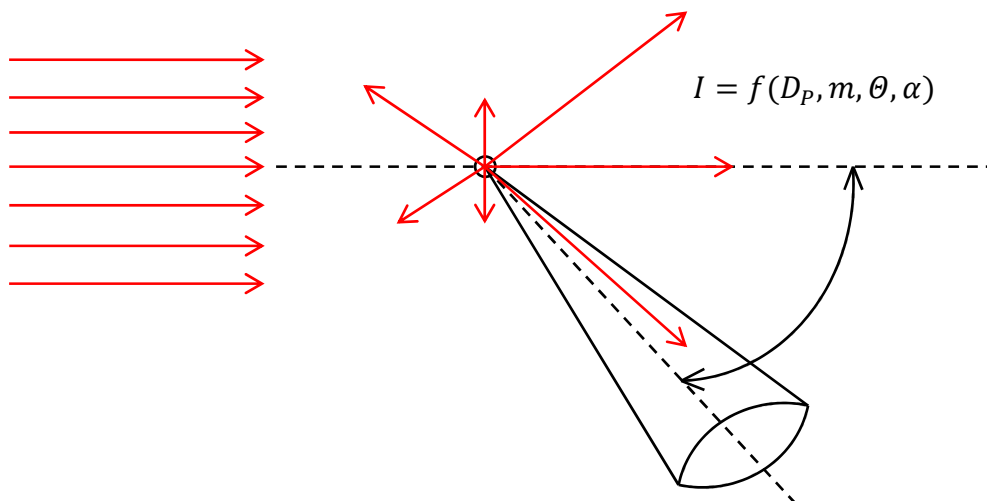


Bild 43: Lichtstreuung an Partikeln [66 p. 8]

Als physikalische Ursachen können Reflexion, Brechung oder Beugung der Lichtwellen an Einzelpartikeln fungieren. Die Intensität des gestreuten Lichts I ist von der Partikelgröße D_p , dem komplexen Brechungsindex des Partikelmaterials m , dem Streuwinkel Θ und der Wellenlänge des Lichts λ abhängig. Dabei ist die Intensität des in einem bestimmten Winkel gestreuten Lichts ein Maß für die Partikelgröße; aus der Anzahl der Impulse lässt sich die Partikelanzahlkonzentration ermitteln. Die Höhe der Streulichtimpulse lässt sich in Klassen einteilen (Streulichtäquivalentdurchmesser).

Der Zusammenhang zwischen Streulichtintensität und Partikeldurchmesser ist abhängig von der Partikelgröße. Diese kann nach [25 p. 129] als Verhältnis α von Partikeldurchmesser D_p zur Wellenlänge des Lichts λ entsprechend Formel (35) dargestellt werden.

$$\alpha = \frac{\pi \cdot D_p}{\lambda} \quad (35)$$

Unterhalb von ca. 50 nm ($\alpha \ll 1$) kann nach [67 p. 359] die Theorie nach Rayleigh Anwendung finden. Diese Rayleigh-Streuung kann nach Formel (36) mit r_p als Abstand zum Partikel berechnet werden. Demnach zeigt sich ein klarer Zusammenhang zwischen Streulichtintensität und Partikelgröße.

$$I(\theta) = \frac{I_0 \cdot \pi^4 \cdot x^6}{8 \cdot r_p^2 \cdot \lambda^4} \cdot \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \cdot (1 + \cos^2 \theta) \quad (36)$$

Der letzte Term von Formel (36) zeigt die Wirkung unterschiedlich polarisierten Lichts. Erfolgt dies senkrecht zur Streuebene, ist die Lichtintensität unabhängig vom Streuwinkel (Multiplikation der ersten beiden Terme mit 1). Parallel zur Streuebene polarisiertes Licht weist eine Abhängigkeit vom Streuwinkel auf (Multiplikation mit $\cos^2 \theta$).

Für Partikelgrößen über 50 nm sind die Gleichungen von *Mie* anzuwenden. Die Streulichtintensität lässt sich demnach entsprechend Formel (37) berechnen. Dabei stellen i_1 und i_2 Intensitätsparameter für das gestreute Licht senkrecht (i_1) und parallel zur Streuebene dar (i_2).

$$I(\theta) = \frac{I_0 \cdot \lambda^2 \cdot (i_1 + i_2)}{8 \cdot \pi \cdot r_p^2} \quad (37)$$

Abhängig vom Streuwinkel variieren die Parameter i_1 und i_2 . Bei sehr kleinen Partikelgrößen treten bei geringfügiger Variation des Streuwinkels z.T. erhebliche Unterschiede auf. Mit zunehmender Partikelgröße erscheinen die Abhängigkeiten zwischen den Parametern i_1 / i_2 und den Streuwinkeln zunehmend komplizierter.

Zur Messung der Partikelgrößenverteilung wurde im Rahmen eigener experimenteller Untersuchungen ein Versuchsaufbau entsprechend Bild 44 mit einem optischen Aerosolspektrometer LAP 322 verwendet. Das verwendete Gerät verfügt über einen HeNe-Laser der Wellenlänge 660 nm, wobei das Streulicht im 90°-Bereich erfasst wird. Die Kalibrierung erfolgte anhand von Kalibrierpartikeln. Das Messvolumen ergibt sich aus der aerodynamischen Fokussierung des Aerosolstrahls und durch den in einer Ebene fokussierten Laserstrahl. Der Messbereich liegt zwischen 0,2 und 40 μm (Aufteilung in bis zu 128 Klassen) bei einer maximalen Messkonzentration von 10^4 - 10^5 Partikeln je cm^3 . Für Messungen auf der Reingasseite kann das Aerosol dem Messgerät deshalb unverdünnt zugeführt werden. Messungen auf der Rohgasseite sind nach Rohgasverdünnung z.B. mit einem Verdünnungssystem DIL 550 (festes Verdünnungsverhältnis 1:100) möglich. Dabei erfolgt eine isokinetische Probenahme aus dem Rohgas beim Eintritt in eine Kapillare. Durch die Umschalteneinheit SYS 520 kann automatisiert zwischen den Messstellen auf der Rein- und Rohgasseite umgeschaltet werden. Ein derartiger Versuchsaufbau ermöglicht versuchsbegleitend quasi-simultane Messungen auf Roh- und Reingasseite. Neben der Teilstromentnahme zur Messung der Partikelgrößenverteilung existieren auch Geräte, die eine in-situ-Messung der Partikelgrößenverteilung ermöglichen. Weitere handelsübliche Aerosolspektrometer können der *VDI-Richtlinie 3867 Blatt 4* entnommen werden. Ein Mehrwert der Berechnung der Fraktionsabscheidegrade ergibt sich nur für wissenschaftliche Einrichtungen und Errichter von Oberflächenfiltern, da die Messgeräte verhältnismäßig teuer sind. Anlagenbetreiber können diese Dienstleistung bei Bedarf auch einkaufen.

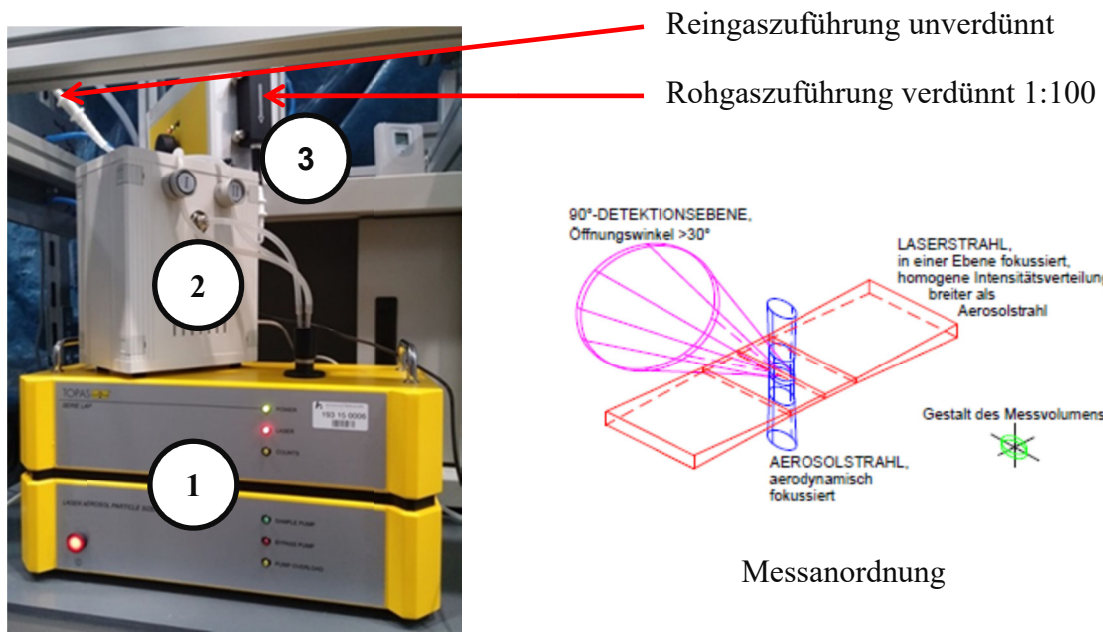


Bild 44: Versuchsaufbau zur Messung der Partikelgrößenverteilung mit Aerosolspektrometer LAP 322 (1) einschließlich Messanordnung [68], Probenahmeumschalteneinheit SYS 520 (2) und Verdünnungssystem DIL 550 (3), Hersteller Fa. Topas

Mit Filterprüfständen experimentell gewonnene Erkenntnisse stellen eine objektive Datengrundlage als Unterstützung für die Auslegung von Oberflächenfiltern dar. Speziell das Zusammenspiel konstruktiver und prozesstechnischer Parameter sowie das Alterungsverhalten der Filtermittel kann praxisnah mit realem Staub und Filtermittel getestet werden. Aus den Untersuchungsergebnissen und speziell den Differenzdruckverläufen lassen sich erste Abschätzungen zum Energie- und Druckluftverbrauch vornehmen, da eine Maßstabsübertragung auf Grundlage der Filterfläche möglich ist. Anhand experimentell abgesicherter Prozessparameter wie z. B. der Filterflächenbelastung ist weiterhin eine belastbare Aussage zur Größe des Filters und den damit verbundenen Investitionskosten möglich. Die Arbeit mit den Filterprüfständen fördert darüber hinaus ein besseres Verständnis der Oberflächenfiltration sowie dessen pragmatische Anwendung. Errichter von Filteranlagen, die über experimentelle Untersuchungsmethoden verfügen, besitzen gegenüber Mitkonkurrenten i. d. R. Wettbewerbsvorteile.

4.2.3 Simulationsgetriebene Produktentwicklung

Bei der Oberflächenfiltration handelt es sich um eine Kombination verschiedener Teilprozesse, bei denen aus Sicht der Druckverluste die Strömungsverhältnisse im Filter sowie die Durchströmung poröser Medien (Filtermittel, Staubkuchen) von entscheidender Bedeutung sind. Die rechnergestützte Simulation bietet das Potenzial, diese z. T. komplexen Prozesse virtuell abzubilden und gezielt zu optimieren, wobei nach [69] allein durch sinnvolle Positionierung von Leitblechen eine Reduzierung des Druckverlusts im Rohgaskanal von 20 % erzielt werden kann. Vorteile sind eine Beschleunigung des Konstruktionsprozesses, die Optimierung des Produktdesigns sowie die erhebliche Reduzierung der Entwicklungskosten und -risiken. Beispiele hierfür sind die Optimierung der Strömungsführung durch den Rohgasraum des Filters zur gleichmäßigen Anströmung der Filterelemente und zur Realisierung einer *top-down*-Strömung. Die Durchführung von Parameterstudien z. B. zur Anordnung der Rohgaszuführung ermöglicht es dabei, verschiedene Konstruktionskonzepte zu prüfen und in der Praxis ausschließlich mit erfolgversprechenden Ansätzen weiterzuarbeiten. Im Rahmen des Kapitels 3 wurde bereits auf weiterführende Untersuchungen mit Nutzung rechnergestützter Simulationen zur Bilanzierung zirkulierender Staubanteile verwiesen. Entscheidend ist dabei der Abgleich experimentell und simulativ gewonnener Ergebnisse, die iterativ angenähert werden können, um experimentelle Untersuchungen zunehmend durch Simulationen zu ersetzen. Mit der Visualisierung komplizierter Prozesse in dreidimensionaler Umgebung sowie durch Animationen wird weiterhin ein besseres Verständnis der Oberflächenfiltration gefördert.

Die numerische Strömungssimulation mit CFD ermöglicht eine Berechnung komplexer Strömungsverhältnisse in Entstaubungsanlagen. Rechnergestützte Simulationen stellen dabei eine sinnvolle Ergänzung oder Alternative zu experimentellen Methoden dar, welche, wenn überhaupt, nur mit verhältnismäßig aufwändigen Versuchen zu nutzbaren Ergebnissen führen würden [70, 71].

Vereinzelte greifen Unternehmen und Institutionen bereits auf ein software-gestütztes Strömungsdesign von Oberflächenfiltern mittels *Computational Fluid Dynamics* (CFD) zurück, um die Aufstromgeschwindigkeit zwischen den Filterelementen gezielt zu verringern. Das Beispiel aus Bild 45 zielt auf eine *top-down*-Strömungsführung durch Leiteinrichtungen [72] ab.

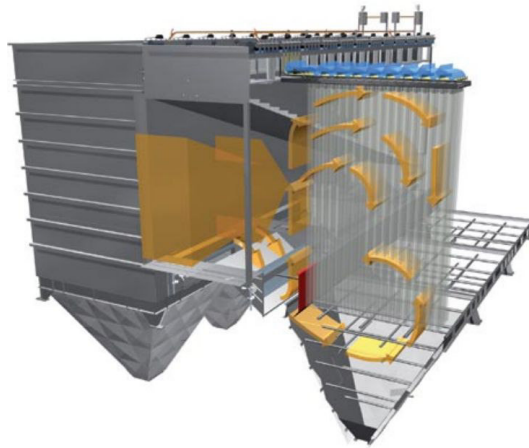


Bild 45: Stömungsdesign mit bevorzugter *top-down*-Strömung [72]

Ebenfalls mit CFD (Software *Fluent*) ist die Simulation des Staubkuchens und seiner Porosität möglich [73]. Der Komplexität der jeweiligen Aufgabenstellung geschuldet kann die Programmierung eines Algorithmus (*user-defined function* – *UDF*) sinnvoll sein, der nicht zur Standardausstattung der Software gehört, jedoch zur ausreichend genauen Abbildung der Prozessbedingungen erforderlich ist. Die vorliegende Anwendung analysiert die Fluidströmung durch das Filtermittel und den Staubkuchen, woraus sich über Analyse von Druckverlusten Aussagen zur Stabilität des Staubkuchens ableiten lassen. Auch *pinholes* als Fehlstellen im Filtermittel konnten damit nachgestellt werden.

Speziell auf den dominanten Einfluss elektrostatischer Ladungen auf Filtrationsprozesse verweist in diesem Zusammenhang [74] anhand von Mikrofasern und Versuchen mit Kochsalz. Es zeigt sich, dass validierte Modelle die Realität teilweise bereits besser wiedergeben als empirische Formeln. Die Entwicklung virtueller Versuchsstände schreitet schnell voran [75].

Simulationen finden auch bei der Entwicklung von Filtermitteln Anwendung [76]. Im Fokus steht dabei ein hoher Partikelabscheidegrad bei möglichst geringem Druckverlust. Auch wenn die Entwicklung ohne Experimente noch nicht durchgeführt werden kann; der Versuchsaufwand reduziert sich bereits erheblich. Die virtuelle Abbildung realer Strukturen kann dabei auch durch Ergebnisse bildgebender Verfahren (z.B. Computertomographie) unterstützt werden.

Eine weitere Möglichkeit der Simulation betrifft die Minimierung der Druckverluste in Rohrleitungsnetzen oder bei der Durchströmung von Filtern. Ziel ist die Minimierung des Druckverlustes der Filteranlage Δp_F infolge einer effizienten Strömungsführung durch den Prozessraum.

Bereits in der Planungsphase kann damit ein signifikanter Beitrag zur Energieeffizienzsteigerungen von Oberflächenfiltern geleistet werden. Als Prozessgrenzen sind die Schnittstellen zu vor- und nachgeschalteten Prozessstufen zu empfehlen. Durch Filtermittel und Staubkuchen verursachte Druckverluste werden dabei zunächst nicht betrachtet. Neben der simulativen Quantifizierung der Druckverluste ist auch ein rechnerischer Ansatz möglich, den Formel (38) am Beispiel des Rohrleitungssystems zeigt [77]. Dabei entspricht der erste Term dem Einfluss der Rohrleitung, die mit der Rohrreibungszahl λ_R , der Rohrlänge L_R und dessen Durchmesser D_R eingeht. Der zweite Term stellt die Summe aller Widerstände in den Rohrleitungen mit der Widerstandszahl ζ dar, wobei auch die Fluidichte ρ_F relevant ist. In beiden Termen geht die Strömungsgeschwindigkeit v quadratisch ein.

$$\Delta p_F = \lambda_R \cdot \frac{L_R}{D_R} \cdot \frac{v^2}{2} + \sum_{i=1}^{i=n} \left(\zeta_i \cdot \rho_F \cdot \frac{v^2}{2} \right) \quad (38)$$

Druckverluste durch lange und ungünstige Rohrleitungsführung oder unnötige Einbauten sind entsprechend Formel (38) zu vermeiden. Speziell Einrichtungen zur Staubvorabscheidung (z.B. Aerozyklone), Volumenstrommessung und -regelung, Strömungsführung (z.B. Prall- und Leitbleche) sowie zum Brandschutz (z.B. Funkenfänger) sind dabei hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Verwendung und baulichen Ausführung kritisch zu hinterfragen.

4.3 Auswahl effizienter Komponenten

Unabhängig von der Konstruktion und Prozessführung stellen verschiedene Komponenten von Oberflächenfiltern Zukaufteile dar, deren Energieeffizienz sich entscheidend auf die Lebenszykluskosten auswirkt. Deutlich wird dies z. B. durch die aktuelle Entwicklung der Industriestrompreise (Bild 46), da Strom als Energiequelle sowohl für den Antrieb von Elektromotoren als auch zur Druckluftherzeugung benötigt wird.

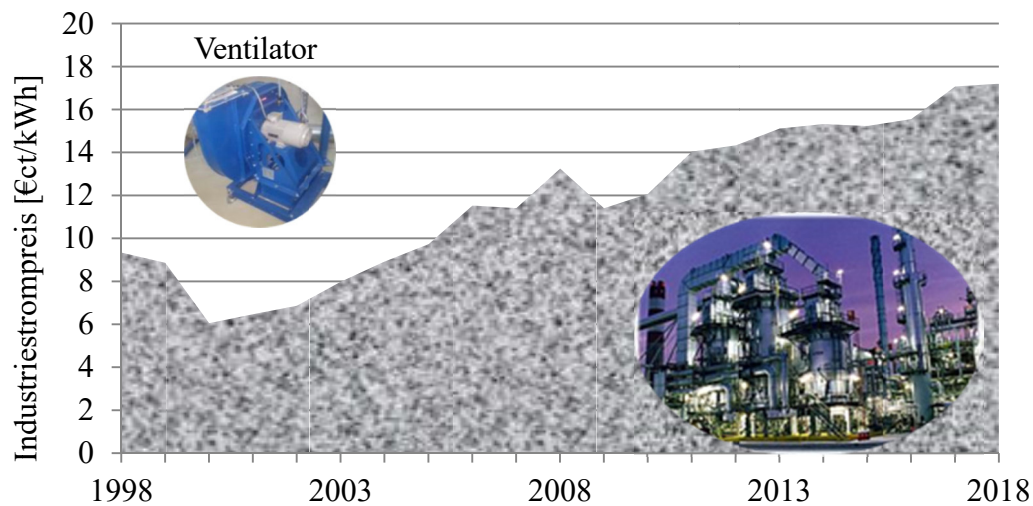


Bild 46: Entwicklung von Industriestrompreisen (inklusive Stromsteuer) im Zeitraum 1998-2018 [78]

Die Nutzung eines Produktkonfigurators entsprechend Bild 33 erleichtert die Auswahl energieeffizienter und damit nachhaltiger Komponenten durch fest hinterlegte Eigenschaften. Tabelle 4 stellt Auswahlmöglichkeiten elektrischer Antriebsmotoren sowie weiterer Komponenten mit wesentlichem Einfluss auf die Energieeffizienz gegenüber und diskutiert diese anschließend.

Tabelle 4: Auswahlmöglichkeiten energieeffizienter Komponenten eines Produktkonfigurators

Aspekt	Beispiele	Einfluss auf...
Elektromotor Ventilator Elektromotor Austragsorgan	Standard	Stromverbrauch
	IE2	
	IE3	
	IE4	
Filtermittel	Nadelfilz	Staubemissionen Stromverbrauch Druckluftverbrauch
	Mikrofaser / Nanofaser	
	Membranfiltermedium	
Filtermittelregenerierung	Standard-Düse & -Ventil	Druckluftverbrauch Staubemissionen
	schnellöffnende Ventiltechnik	
	Coanda-Düsen	

4.3.1 Elektromotor

Den größten Energieverbraucher eines Oberflächenfilters stellt der Ventilator dar, der sorgfältig ausgewählt werden sollte. Bei den zu erwartenden Differenzdrücken muss der erforderliche Volumenstrom sicher erreicht werden. Trotz der verhältnismäßig geringen Staubbeladung auf der Reingasseite ist mit zunehmender Betriebsdauer eine erhebliche Verschmutzung des Laufrads zu erwarten, was u. a. Verschleiß und Unwuchten zur Folge hat. Der Ventilator muss aus diesen Gründen für Entstaubungsanwendungen ausgelegt sein und darf nicht überdimensioniert werden, da der Wirkungsgrad lastabhängig ist und speziell unterhalb von 50 % erheblich absinkt. Dies ist besonders bei Einsatz von Frequenzumrichtern zu beachten, welche zur Regelung der Volumenströme z.B. bei schwankenden Rohgasstaubkonzentrationen verwendet werden. Auf eine noch immer häufig in der Praxis anzutreffende Volumenstromeinstellung mit Schiebern und Klappen ist möglichst zu verzichten.

Die Herstellung von Elektromotoren ist hinsichtlich Energieeffizienz u. a. durch die *Ökodesign-Richtlinie* gesetzlich reglementiert [79,80,81]. Demnach werden Elektromotoren in weltweit harmonisierte Klassen eingeteilt (IE-Code IE1-IE4) und müssen herstellerseitig entsprechend gekennzeichnet werden. Sukzessive werden nur noch hocheffiziente Elektromotoren am Markt zugelassen sein. Im Nennlastbereich liegen die Unterschiede zwischen einem IE1 und einem IE4-Motor bei ca. 4 % Wirkungsgrad. Bei einem Teillastbetrieb des Motors von 50 % besteht dieser Unterschied allein zwischen einem IE1 und einem IE2-Motor.

4.3.2 Filtermittel

Ein entscheidendes Kriterium für die Filtermittelauswahl ist ein geringer Anstieg des Druckverlusts mit zunehmender Standzeit. Neben der Abstimmung des Filtermittels auf den abzuscheidenden Staub sind dabei auch die Prozessbedingungen entscheidend. Mit zunehmender Filterflächenbelastung und Regenerierungsintensität sinkt dabei tendenziell die Standzeit [82]. Diese Filtermittalterung infolge irreversibler Partikeleinlagerungen ist unvermeidlich und führt zu einem spezifischen Druckverlust Δp_K , kann aber durch Auswahl des Filtermittels beeinflusst werden. Membranfiltermedien weisen dabei den Vorteil verhältnismäßig geringer Alterungseffekte sowie der geringeren Tendenz zu zirkulierenden Staubanteilen auf. Zusätzlich ermöglichen Membranfiltermedien im Vergleich zu Nadelfilzen erheblich geringere Staubemissionen. Dem gegenüber steht ein verhältnismäßig hoher Anfangsdruckverlust des Filtermit-

tels Δp_{FM} . Grundsätzlich sind die ökonomischen Ziele der Oberflächenfiltration konträr zu den ökologischen Zielen geringer Abscheidegrade. Gealterte Nadelfilze weisen dabei i. d. R. höhere Abscheidegrade auf als Neuwertige. In Anbetracht dieser Aspekte werden moderne Filtermittel mit funktionalen Oberflächen wie Membranen zunehmend an Bedeutung gewinnen. Es ist abzuwarten, welchen Beitrag neu entwickelte Filtermittel mit Mikro- und Nanofaserauflage in diesem Zusammenhang leisten können. Der durch das Filtermittel verursachte Differenzdruck Δp_{FM} kann im Vergleich zu einem konventionellen Nadelfilz bei Membranfiltermedien bis zum Faktor 2 höher liegen. Im Gegenzug treten bei Membranfiltermedien z.T. erheblich geringere Staubemissionen auf (Faktor 10 oder höher), was u. a. eigene Untersuchungen zeigten (siehe Kapitel 5.3.1).

4.3.3 Filtermittelregenerierung

Der durch die Filtermittelregenerierung verursachte Druckluftverbrauch kann durch die verwendete Ventiltechnik, die Position von Druckluftspeichern (Windkessel) sowie das Druckluftnetz minimiert werden. Hochwertige Ventiltechnik öffnet sich bei Auslösung des Druckluftstoßes sehr schnell. Der resultierende rasche Druckanstieg im Filterelement begünstigt dabei die wichtige Abreinigung des Staubkuchens aufgrund von Trägheitseffekten (siehe Kapitel 2.4.3). Durch Nutzung des Venturi-Prinzips z. B. mit patentierten Coanda-Injektoren [83] kann der Druckluftverbrauch um bis zu 60 % reduziert werden [69]. Auch die Reingasstaubkonzentrationen kann damit im Vergleich zu einer Lochdüse um bis zu 80 % verringert werden, wie Versuche mit einem Nadelfilz zeigen.

Kompakte Druckluftspeicher sollten direkt am Filter z. B. bei reihenweiser Abreinigung am Ende jeder Reihe angeordnet sein, um das gewünschte Druckluftniveau effektiv den Filterelementen zuzuführen. Hierbei bieten sich auch kompakte Ventil-in-Tank-Lösungen an, wobei das Ventil direkt in den Drucklufttank integriert ist. Das Druckluftnetz sollte festverrohrt und mit möglichst geringen Strömungswiderständen ausgeführt werden.

4.4 Minimierung der Druckverluste

Alle in Kapitel 4 vorgestellten Aktivitäten zur Effizienzsteigerung von Oberflächenfiltern können vereinfacht auf die Zielstellungen der Minimierung von Druckverlusten und deren effiziente Erzeugung reduziert werden. Wesentliche anlagen- und prozessspezifische Druckverluste

werden durch Bild 47 veranschaulicht. Für die Optimierung sollten diese einzeln und differenziert betrachtet werden, wobei Formel (15) um weitere Elemente erweitert und zu Formel (39) wird. Dabei stellt Δp_F den Druckverlust der Filteranlage dar, der nach [69] 11 % des Gesamtdruckverlust des Filters betragen kann. Der durch das Filtermittel (Δp_{FM}) und darin eingelagerte Partikel verursachte Druckverlust (Δp_K) werden separiert betrachtet. Gleiches gilt für den Staubkuchen (Δp_{SK}) und zirkulierende Staubanteile (Δp_{ZSA}).

$$\Delta p = \Delta p_F + \Delta p_{FM} + \Delta p_K + \Delta p_{SK} + \Delta p_{ZSA} \quad (39)$$

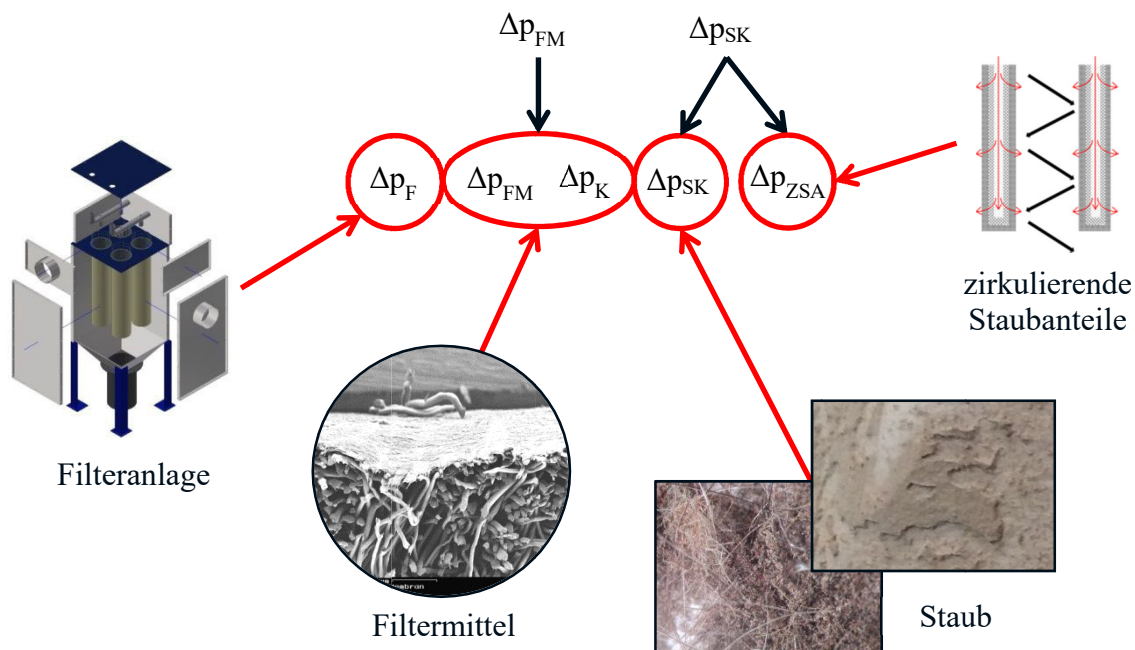


Bild 47: Energieeffizienz im Fokus der Auslegung von Oberflächenfiltern

Aus dieser energetischen Beurteilung von Oberflächenfiltrationsprozessen wird deutlich, dass sich der aus der Gesamtheit aller Konstruktions- und Prozessparameter ergebende Differenzdruck auf verschiedene Ursachen zurückführen lässt, welche zwar in Wechselwirkung miteinander stehen, sich jedoch durchaus individuell optimieren lassen. In Summe können die energetischen Vorteile effizient ausgelegter und betriebener Filter auf deutlich im zweistelligen Prozentbereich geschätzt werden. Aufgrund mangelnder Erfahrungswerte aus der Praxis ist keine detailliertere, seriöse Schätzung möglich. Das Potenzial unterschiedlicher Entstaubungsanwendungen muss stets individuell beurteilt und quantifiziert werden. Errichter von Entstaubungsanlagen sollten zur Erhebung dieser Daten verstärkt in die Verantwortung genommen werden.

5 Potenzialbewertung des Rotationsentstaubers als neuartiger Oberflächenfilter

Die Effizienz von Oberflächenfiltern verschlechtert sich z.T. erheblich bei Abscheidung problematischer Stäube, die stark zu zirkulierenden Staubanteilen neigen. Wie in den Kapiteln 3 und 4 herausgearbeitet hat dies Auswirkungen auf den Energieverbrauch und die Staubemissionen eines Oberflächenfilters. Die Errichtung ausreichend groß dimensionierter Filter findet aufgrund begrenzt zur Verfügung stehenden Platzes sowie hoher Investitionskosten kaum statt. Neben der Weiterentwicklung bestehender Oberflächenfilter sind deshalb neue Anlagenkonzepte gefragt, die speziell auf Vermeidung zirkulierender Staubanteile abzielen. Der Platzbedarf und die Effizienz des Oberflächenfilters könnten damit z. T. entkoppelt werden. Einen derartigen Ansatz stellt der Rotationsentstauber dar. Hinsichtlich Aufbau und Funktion existieren entscheidende Unterschiede zu konventionellen Oberflächenfiltern mit scheinbar großem Potenzial zur Vermeidung zirkulierender Staubanteile.

Ziel des vorliegenden Kapitels ist es, das Potenzial des Rotationsentstaubers als neuartigen Oberflächenfilter zu bewerten. Dazu erfolgt zunächst eine theoretische Beurteilung dieses Ansatzes (Kapitel 5.1). Konstruktive und prozesstechnische Unterschiede des Rotationsentstaubers werden dabei im Vergleich zu konventionellen Oberflächenfiltern im Hinblick auf die Effizienz bewertet. Die neuen Erkenntnisse zu zirkulierenden Staubanteilen finden Anwendung. Mit der Methodik des Benchmarking kann die Leistungsfähigkeit des Rotationsentstaubers objektiv bewertet werden (Kapitel 5.2). Dazu werden Leistungsparameter definiert, die für den Rotationsentstauber als Innovation sowie einen konventionellen Oberflächenfilter als Referenz ermittelt werden. Auf dieser Basis wird ein Versuchsaufbau konzipiert und realisiert, welcher den entworfenen Benchmark ermöglicht. Die Ergebnisse werden in Kapitel 5.3 gegenübergestellt und diskutiert. Eine abschließende Potenzialbewertung des Rotationsentstaubers findet durch Betrachtung der Lebenszykluskosten statt.

5.1 Idee des Rotationsentstaubers

Bei dem Rotationsentstauber handelt es sich um einen patentierten Ansatz [84], der noch nicht am Markt vertreten ist. Während bei einer konventionellen Oberflächenfiltration die Teilprozesse der Anfiltration von Staub auf das Filtermittel (F) und dessen Regenerierung (R) zeitlich

nacheinander im gleichen Prozessraum stattfinden, erfolgen diese Teilprozesse beim Rotationsentstauber zeitgleich in unterschiedlichen Räumen (Bild 48). Dazu ist eine konstruktive Trennung jedes Filterelements in ein Filtrations- und ein Regenerierungssegment mit entsprechender Abdichtung erforderlich. Dies führt zu unterschiedlichen Druckverhältnissen im Filtrations- (Unterdruck) und Regenerierungssegment (Überdruck). Im Regenerierungssegment findet damit eine quasi-off-line-Regenerierung statt, wobei Wechselwirkungen abgereinigter Stäube mit dem regenerierten Filterelement (ZSA_A) vermieden werden. Bei vollständiger Kapselung des Regenerierungssegmentes können auch unerwünschte Wechselwirkungen mit benachbarten Filterelementen (ZSA_B) vermieden werden. Die Effizienz der Abscheidung problematischer Stäube könnte demnach mit dem Rotationsentstauber signifikant verbessert werden.

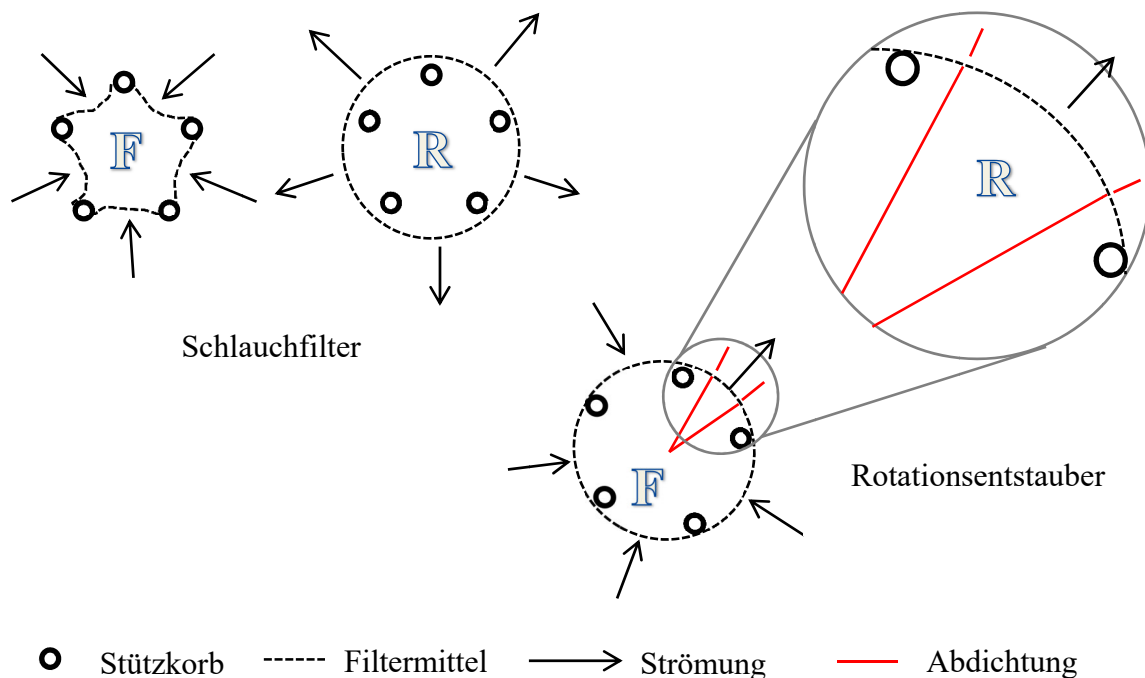


Bild 48: Konzept Rotationsentstauber und Schlauchfilter (Querschnitt eines Filterelements) mit den Teilprozessen Anfiltration von Staub auf das Filtermittel (F) und Regenerierung des Filtermittels (R)

Im Kern dieser Idee fungiert eine kontinuierlich rotierende Filtertrommel als Grundelement des Rotationsentstaubers (Bild 49). Die Anfiltration des Staubs findet von außen auf deren Mantelfläche statt, auf der sich das Filtermittel befindet. Der Ventilator ist reingasseitig angeordnet; das Reingas wird nach oben aus der Trommel gefördert. Diese ist in ein Filtrations- und ein Regenerierungssegment (rote Kennzeichnung Bild 49) unterteilt. Beide Segmente sind sowohl innerhalb der Trommel (Reingasseite) als auch außerhalb der Trommel (Rohgasseite) konstruktiv voneinander getrennt. Die Regenerierung der Filterelemente erfolgt durch einen reingasseitigen

Druckluftstoß ausschließlich im Regenerierungssegment, worüber auch der Staubaustrag nach unten erfolgt. Das Regenerierungssegment besitzt eine feste Position.

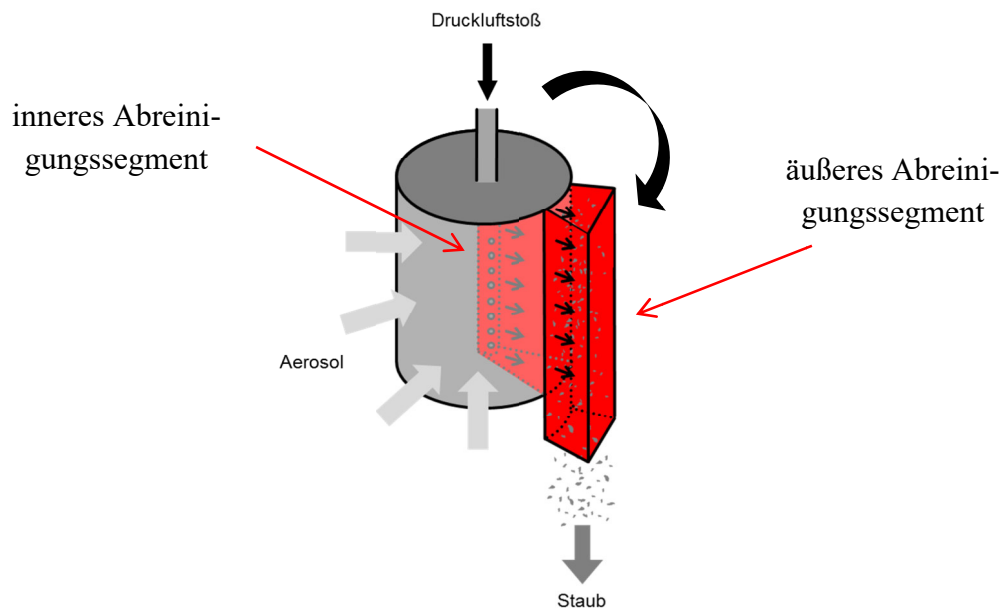


Bild 49: Grundelement Rotationsentstauber

Durch die zeitgleich stattfindenden Teilprozesse der Filtration und Regenerierung ist im Gegensatz zu einem konventionellen Oberflächenfilter ein verhältnismäßig gleichbleibendes Differenzdruckniveau zwischen Roh- und Reingasseite zu erwarten (Bild 50). Somit besteht für den Rotationsentstauber die Möglichkeit zur Prozessregelung über die Trommeldrehzahl. Je nach Rohgasaufkommen können somit Ventilatorleistung und Regenerierungsintensität gezielt angepasst werden. Ferner sind Veränderungen vorgeschalteter Prozessstufen wie z.B. Staubkonzentration oder granulometrischer Eigenschaften über den Indikator Differenzdruck frühzeitig detektierbar. Zur Regenerierung des Filtermittels sind aufgrund der limitierten Größe des Regenerierungssegmentes mehrere Druckluftstöße je Trommelumdrehung notwendig.

Die Literatur-, Patent- und Marktrecherchen ergaben kein Entstaubungskonzept, welches hinsichtlich Aufbau und Arbeitsweise dem Rotationsentstauber entspricht. Zur Abscheidung von Fasern sind aus der Textilindustrie Trommelfilter von Herstellern wie z. B. Felutex (CH) [85] oder LTG (D) [86] bekannt, die sich bezüglich Staubart und -feinheit allerdings deutlich von der Anwendung des Rotationsentstaubers unterscheiden. Gleiches gilt für das Rotatronic-System der Fa. TRM Filter (SLO) [87], bei dem horizontal angeordnete, plissierte Filterpatronen mit innen liegenden, rotierenden Düsen off-line regeneriert werden. Ansätze, Trommelfilter (Prinzip

aus der Fest-flüssig-Trennung bekannt: z. B. Vakuum-Trommelzellenfilter, Kantenspaltfilter Fa. Mahle [88], Rückspülfilter Fa. Lenzing [89]) für Entstaubungsanwendungen zu adaptieren, werden in der älteren Literatur vereinzelt beschrieben [90–94], sind allerdings am Markt nicht zu finden.

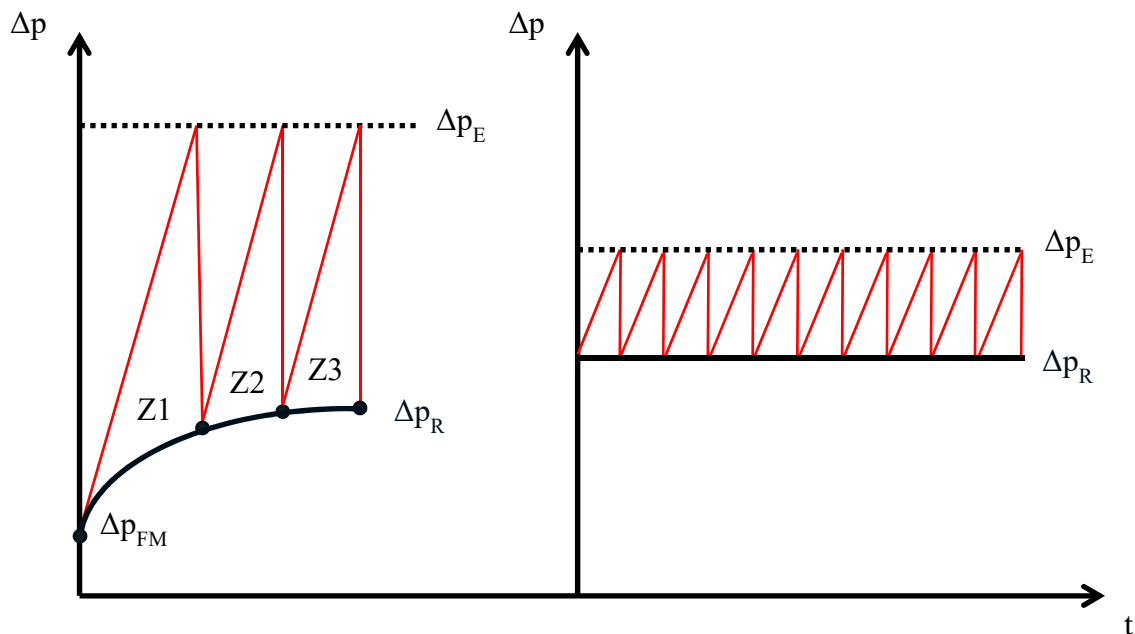


Bild 50: Differenzdruckverlauf zwischen Roh- und Reingasseite im Vergleich Schlauchfilter (links) und Rotationsentstauber (rechts)

5.2 Benchmarking bei der Oberflächenfiltration

5.2.1 Methodik

Zur objektiven Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Oberflächenfiltern kann das Managementinstrument Benchmarking genutzt werden. Nach [95 p. 5] wird dies als Suche nach den besten Praktiken und deren Implementierung beschrieben. In diesem Kontext werden bewährte Filtertypen bzw. Prozesseinstellungen als Best-Practice-Beispiel (Referenzfilter) angesehen. Die zu beurteilende Änderung konstruktiver oder prozesstechnischer Parameter (Innovation) wird dem gegenübergestellt und unter vergleichbaren Bedingungen beurteilt. Das Vorgehen beim Benchmarking gliedert sich in drei wesentliche Schritte:

- Konzeption
- Festlegung der Leistungsparameter
- Prozessbeurteilung

Die Konzeption umfasst die Definition der Zielstellung des Benchmarks sowie der Rahmenbedingungen, unter denen dieser durchgeführt wird. Grundsätzlich werden Referenz (etablierter Oberflächenfilter) und Innovation (Rotationsentstauber) unter vergleichbaren Bedingungen untersucht, um spezifische Unterschiede hinsichtlich der Prozesseffizienz herauszuarbeiten. Ambitionierte Prozessbedingungen mit verhältnismäßig hohen Filterflächenbelastungen dienen der schnellen und klaren Ermittlung spezifischer Vor- und Nachteile. Die Festlegung der Leistungsparameter beinhaltet die Strategie zur Erfassung, Aufbereitung und Auswertung von Informationen, welche eine umfassende Beurteilung der im Rahmen des Benchmarks zu vergleichenden Innovation und Referenz ermöglichen. Alle Leistungsparameter, anhand derer die Prozessbeurteilung vorgenommen wird, basieren möglichst auf Messdaten, die objektiv beurteilbar sind. Abschließend findet die Prozessbeurteilung statt. Dabei ist die Interpretation der Leistungsparameter unter den jeweiligen Rahmenbedingungen entscheidend. Zu berücksichtigen sind dabei insbesondere aktuelle gesetzliche Entwicklungen, neueste wissenschaftliche Erkenntnisse sowie moderne Methoden der Auslegung, des Betriebs sowie der Instandhaltung von Oberflächenfiltern.

5.2.2 Konzeption und Realisierung des Versuchsaufbaus

Der konzipierte Benchmark sieht Untersuchungen im Technikumsmaßstab vor. Der Rotationsentstauber wurde als Funktionsmodell mit einem Filterelement aufgebaut (Bild 51). Als Vorlage hierfür diente der Entwurf des Grundelements entsprechend Bild 49. Technische Details des Technikums-Rotationsentstaubers zeigt Anhang 10. Die Rohgaszuführung erfolgt seitlich gegenüber dem Regenerierungssegment, wobei das im Uhrzeigersinn rotierende Filterelement durch eine Prallplatte geschützt wird. Das Reingas wird nach oben über einen Stutzen abgeführt. Der Staubaustrag befindet sich an der Unterseite des Regenerierungssegmentes. Der Versuchsaufbau wurde für Untersuchungen unter vergleichbaren Bedingungen entsprechend Bild 37 konzipiert. Zur Erfassung der Staubkonzentration und Partikelgrößenverteilung wurden die in Kapitel 4.2.2 erläuterten Messgeräte verwendet. Als Referenz zum Rotationsentstauber wurde ein Schlauchfilter als weit verbreiteter Oberflächenfilter gewählt. Dieser wurde bereits in Kapitel 3.4.4 vorgestellt.

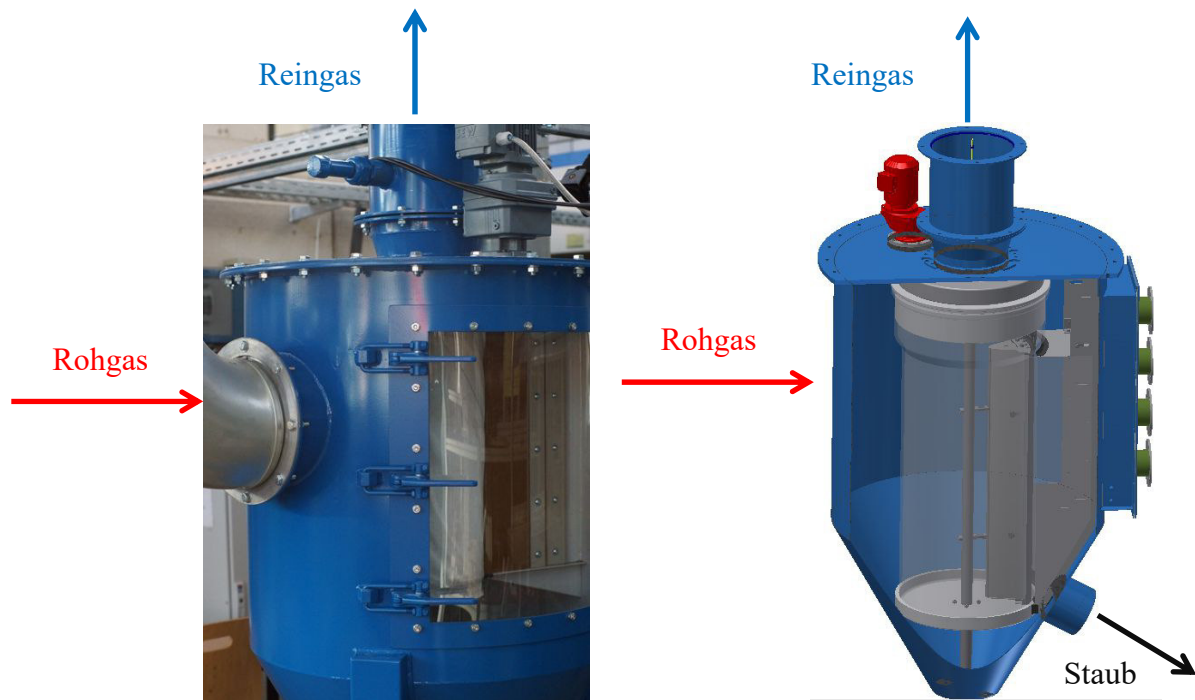


Bild 51: Funktionsmodell Rotationsentstauber real (links) und schematisch (rechts)

Bedingt durch spezifische Unterschiede zwischen Rotationsentstauber und Schlauchfilter sind die Versuchseinstellungen entsprechend anzupassen, um vergleichbare Rahmenbedingungen für die Versuchsreihen des Benchmarks zu gewährleisten (Tabelle 5).

Tabelle 5: Versuchseinstellungen Benchmark

Parameter	Schlauchfilter	Rotationsentstauber	Versuchsreihe
Staub	Flugasche		1
	Calcit MS12		2
Dosierung	einheitlich (p _D : 1,4 bar, v _B : 1 mm/s, Bypass 0)		1, 2
Filtermittel	Nadelfilz P-PES-550-150		1
	Membranfiltermedium PE-540-PTFE-E-Membran		2
Filterflächenbelastung	180 Bm ³ / (m ² · h)		1, 2
Filterelemente	2	1	
effektive Filterfläche	0,8264 m ²	0,7032 m ²	
Volumenstrom	149 m ³ /h	126 m ³ /h	
Zykluszeit	240 s (zeitgesteuerte Regenerierung)		
Druckluftstöße je Zyklus	1	8	
Regenerierungsintensität	5,0 bar, 100 ms Ventilöffnungszeit		

Dabei kommen unterschiedliche Stäube und Filtermittel einer jeweils einheitlichen Charge zum Einsatz. Der Staub wird unter vergleichbaren Bedingungen dosiert. Zur Einstellung einheitlicher Filterflächenbelastungen sind unterschiedliche Volumenströme erforderlich, da beide Filter über verschiedene effektive Filterflächen verfügen. Es erfolgt eine zeitgesteuerte Regenerierung, um die energetischen Auswirkungen beider Filtertypen auf Basis unterschiedlicher Differenzdruckverläufe beurteilen zu können. Bedingt durch die Größe des Regenerierungssegments des Rotationsentstaubers sind im Gegensatz zum Schlauchfilter mehrere Druckluftstöße je Filtrationszyklus erforderlich. Die Intensität beider Filtermittelregenerierungen wurde hinsichtlich Druckniveau und Ventilöffnungszeit einheitlich eingestellt.

5.2.3 Festlegung der Leistungsparameter

Die für den Benchmark festzulegenden Leistungsparameter können aus der Bilanzierung von Oberflächenfiltern entsprechend Kapitel 2.6 abgeleitet werden:

- Reingasstaubkonzentration
- Fraktionsabscheidegrad
- Stromverbrauch
- Druckluftverbrauch

Die gemessenen Reingasstaubkonzentrationen werden auf Normzustand umgerechnet. Der Fraktionsabscheidegrad wird aus quasi-simultanen Messungen der Partikelgrößenverteilung auf Roh- und Reingasseite berechnet. Der Stromverbrauch wird über den Indikator Differenzdruck angegeben, was einen relativen Vergleich beider Filter ermöglicht. Dem Differenzdruck können auf Basis von Leistungsmessungen konkrete Werte für die effektive Leistungsaufnahme des Ventilators ohne störenden Einfluss des Versuchsaufbaus zugeordnet werden (Anhang 11). Gemeinsam mit der Leistungsaufnahme weiterer Komponenten erfolgt daraufhin eine Abschätzung des Stromverbrauchs. Der Druckluftverbrauch je Druckluftstoß von Schlauchfilter (Anhang 12a) und Rotationsentstauber (Anhang 12b) lässt sich aus Druckluftverbrauchsmessungen ermitteln und auf Normzustand umrechnen. In Kombination mit der Anzahl der Druckluftstöße lässt sich daraus der Druckluftverbrauch quantifizieren.

5.3 Prozessbeurteilung

Im Rahmen des Benchmarking wurden mehrere Versuchsreihen entsprechend Tabelle 5 durchgeführt. Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse des Benchmarks zwischen Rotationsentstauber und Schlauchfilter anhand der Leistungsparameter diskutiert. Eine abschließende Bewertung erfolgt auf Basis der Lebenszykluskosten.

5.3.1 Diskussion der Ergebnisse anhand der Leistungsparameter

Tabelle 6 zeigt auf Basis der entsprechend Anhang 13 ermittelten Leistungsparameter und Kennzahlen, dass die Versuchsreihen analog zur Planung unter vergleichbaren Bedingungen erfolgten. Klimatische Unterschiede zwischen den Versuchen führen zu einer geringfügig niedrigeren Filterflächenbelastung des Rotationsentstaubers (ca. 1,5 %). Eine ähnliche Tendenz ergibt sich für die Rohgasstaubkonzentration, die bei dem Rotationsentstauber um ca. 6,6 % geringer ist, was bei der Berechnung des Stromverbrauchs berücksichtigt wurde. Die Rohgasstaubkonzentration wird aus dem physisch im Filter anfallenden Staub und dem Feststoffmassenstrom des Reingases ermittelt. Die Standzeit der Filtermittel ist bei beiden Oberflächenfiltern nahezu identisch.

Tabelle 6: Ergebnisse Benchmark, Versuchsreihe 1 (Angaben als Mittelwerte repräsentativer Versuchszeiträume)

Kennwert	Rotationsentstauber	Schlauchfilter
Filterflächenbelastung [$Nm^3 / (m^2 \cdot h)$]	154,93	157,29
Rohgasstaubkonzentration [g/Nm^3]	0,9699	1,0380
Standzeit Filtermittel (Zyklen)	7731	7735
Reingasstaubkonzentration [mg/Nm^3]	0,6971	0,0167
Differenzdruck [Pa]	319,52	403,94
Druckluftverbrauch [Nl/h]	999,74	220,58

Die Reingasstaubkonzentration als Leistungsparameter zeigt deutliche Vorteile des Schlauchfilters, dessen Staubemissionen nur ca. 2,4 % der des Rotationsentstaubers betragen. Als Grund hierfür kann das frisch regenerierte Filtermittel des Rotationsentstaubers angesehen werden, welches kontinuierlich aus dem Regenerierungssegment austritt. Dennoch liegen die Emissionen deutlich unter üblichen, gesetzlich vorgeschriebenen, Grenzwerten. Bedingt durch die Ka-

librierung des Reingasstaubkonzentrationsmessgerätes auf ein DEHS-Tropfenaerosol und geringfügige Staubverluste bei der Versuchsdurchführung kann sich dieser Leistungsparameter absolut betrachtet unwesentlich von den realen Bedingungen unterscheiden. Die stetige Anwesenheit des frisch regenerierten Filtermittels im Rohgasraum ist neben der Vermeidung zirkulierender Staubanteile auch als ein Grund für den geringeren Differenzdruck des Rotationsentstaubers zu sehen. Der energetische Vorteil des Rotationsentstaubers liegt bei ca. 21 %. In Anbetracht von Problemen bei der Abdichtung des Rotationsentstaubers zwischen Filtrations- und Regenerierungssegment ist davon auszugehen, dass das theoretische Potenzial zur Vermeidung zirkulierender Staubanteile nur anteilig ausgenutzt wurde. Infolge der Größe des Regenerierungssegmentes des Rotationsentstaubers sind acht Druckluftstöße je Filtrationszyklus erforderlich. Auch wenn die je Druckluftstoß benötigte Menge an Druckluft geringer ist als die eines Druckluftstoßes am Schlauchfilter, führt dies zu einem signifikant höheren Druckluftverbrauch mit einem Faktor von ca. 4,5. Die unterschiedliche Anzahl von Druckluftstößen je Filtrationszyklus spiegelt sich auch in der Reingasstaubkonzentration mit den charakteristischen Maxima wider (Bild 52). Untersuchungen mit Membranfiltermedien zeigen Unterschiede zwischen Rotationsentstauber und Schlauchfilter. Die Emissionen des Schlauchfilters liegen dabei insgesamt jedoch auf einem deutlich geringeren Niveau (Unterschied ca. Faktor 10).

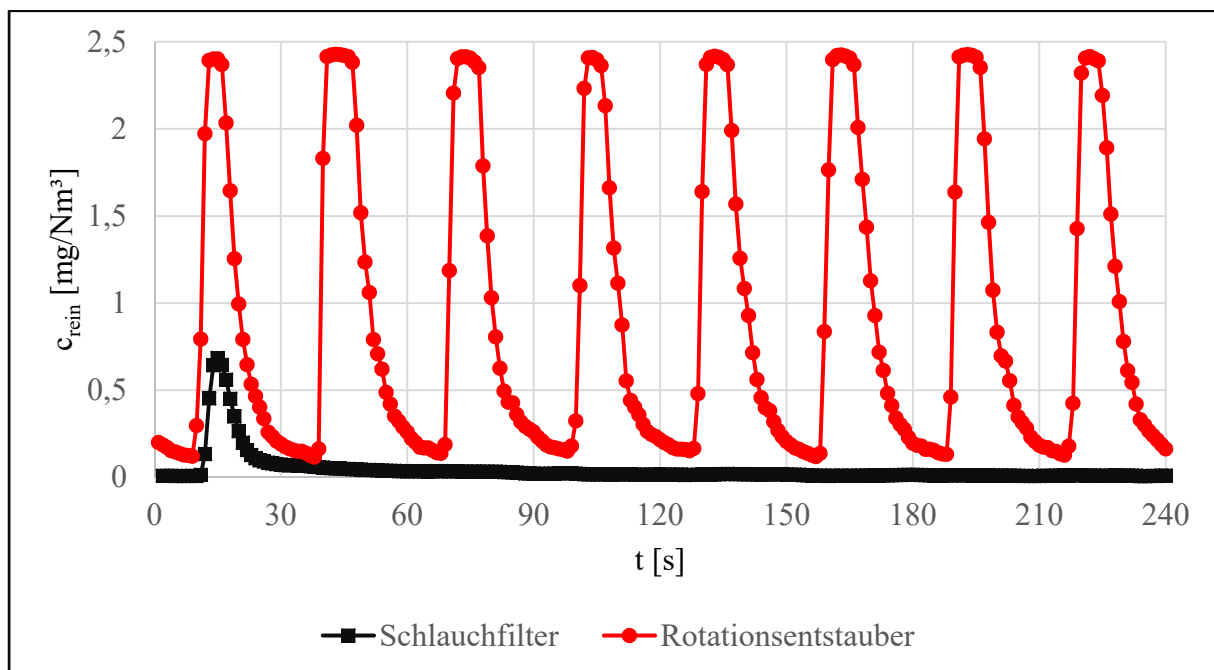


Bild 52: Filterspezifische Staubemissionen, Versuchsreihe 1

Die Fraktionsabscheidegrade belegen ebenfalls eine höhere Effizienz der Partikelabscheidung des Schlauchfilters im Vergleich zum Rotationsentstauber (Bild 53). Am Beispiel des Staubs Calcit MS12 und eines Membranfiltermediums werden beim Schlauchfilter verhältnismäßig hohe Abscheidegrade ermittelt, die sich erwartungsgemäß ab Partikelgrößenklassen $< 0,3 \mu\text{m}$ deutlich verschlechtern (*mpps*).

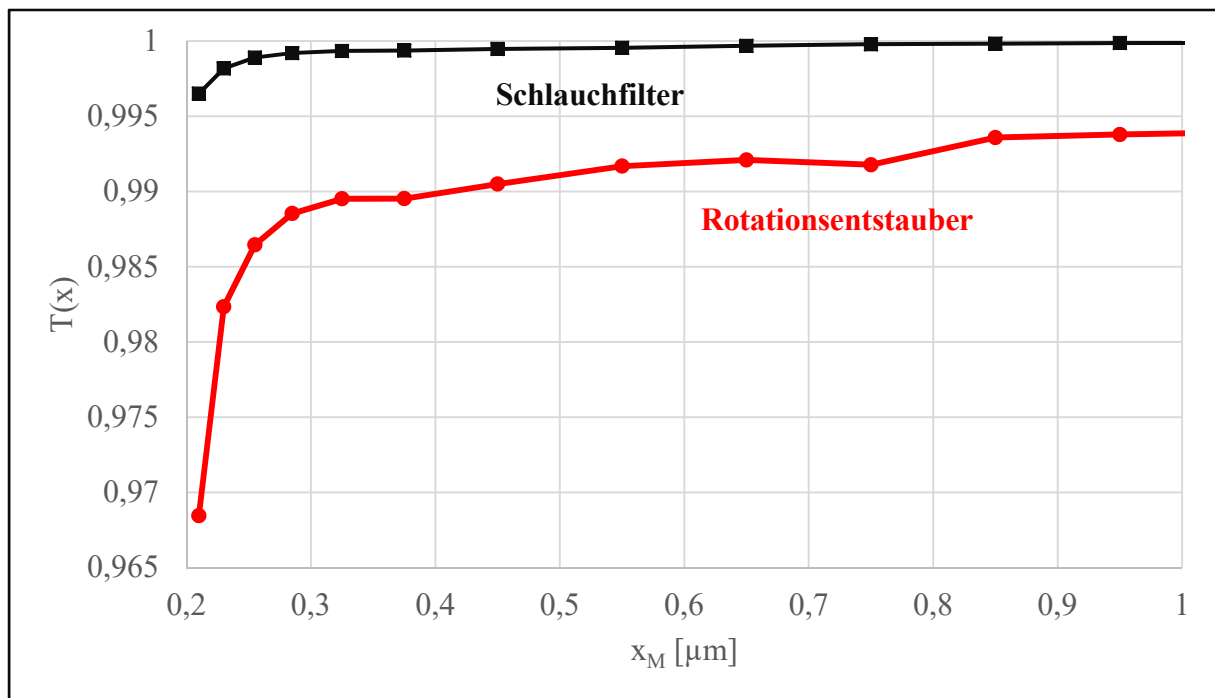


Bild 53: Filterspezifische Fraktionsabscheidegrade, Versuchsreihe 2 (Anhang 14)

5.3.2 Betrachtung der Lebenszykluskosten

Zur Ermittlung der Lebenszykluskosten sind zunächst die Investitionskosten zu bestimmen. Für den durchgeführten Benchmark wurden dazu ein Rotationsentstauber und ein Schlauchfilter im technischen Maßstab konzipiert (Tabelle 7). Der Filter ist ausgelegt, um einen Rohgasvolumenstrom von $50000 \text{ m}^3/\text{h}$ zu reinigen. Durch Reduzierung zirkulierender Staubanteile wird für den Rotationsentstauber eine 10 % höhere Filterflächenbelastung angenommen, was zu einem kompakteren Filter führt. Die Konfektionierung des Filtermittels erfolgte analog zu den zur Verfügung stehenden Technikumsanlagen. Länge und Anordnung der Filterelemente wurden von existierenden Oberflächenfiltern vorgegeben.

Tabelle 7: Konstruktive Auslegungskriterien Rotationsentstauber und Schlauchfilter

Ausstattungsmerkmal	Schlauchfilter	Rotationsentstauber
Volumenstrom	50000 m ³ /h	
Filterflächenbelastung	100 m ³ /(m ² · h)	110 m ³ /(m ² · h)
Konfektionierung Filtermittel (gerade Anordnung)	230 Filterschläuche, Länge 5,0 m, Durchmesser 0,148 m Gassenabstand 0,05 m	121 Filtertrommeln, Länge 5,0 m, Durchmesser 0,323 m Gassenabstand 0,05 m
Filtermittelaufhängung	statisch mit Stützkorb	rotierende Lochblechtrommel
Gehäuse/Stahlbau	Stahlbau, quadratischer Querschnitt	
Filtermittelregenerierung (reihenweise)	15 Reihen 1 Ventil je Reihe	11 Reihen 1 Ventil je Reihe
Lüfter	Leistung 70 kW, Volumenstrom max. 80000 m ³ /h, Differenzdruck max. 3500 Pa, reingasseitiger Einbau	
Austragsorgan	Zellenradschleuse	

Die Eckpunkte der Versuchsanlagen sind in Tabelle 7 zusammengefasst und dienen der Kostenermittlung. Sie sind in Tabelle 8 gegenübergestellt, mit Angeboten untersetzt oder auf Grundlage von Erfahrungswerten aus vergleichbaren Projekten geschätzt. Nicht betrachtet werden an dieser Stelle Ausgaben für die Filterperipherie (u. a. Zu- und Abführung von Roh- und Reingas, Druckluftleitungen) sowie Kosten für Mess- und Automatisierungstechnik.

Tabelle 8: Vergleich der Nettoinvestitionskosten von Rotationsentstauber und Schlauchfilter

Position	Schlauchfilter	Rotationsentstauber
Engineering	10.000,00 €	15.000,00 €
Gehäuse/Stahlbau	30.000,00 €	40.000,00 €
Stützkörbe/Lochblechtrommel	9.200,00 €	9.680,00 €
Filtermittel	3.565,00 €	2.601,50 €
Lagerung inkl. Trommelantrieb	0,00 €	115.000,00 €
Ventiltechnik	2.980,80 €	2.049,30 €
Lüfter	10.000,00 €	10.000,00 €
Zellenradschleuse	4.000,00 €	4.000,00 €
Aufbau	10.000,00 €	15.000,00 €
Summe	79.745,80 €	213.330,80 €

Tabelle 9 enthält das Resultat der Lebenszykluskostenrechnung, welches sich aus den Investitionskosten sowie den auf Basis des durchgeführten Benchmarks abschätzbaren Betriebskosten ergibt. Bild 54 zeigt die Verteilung der Lebenszykluskosten auf wesentliche Positionen. Für die Abschätzung der Lebenszykluskosten wurden folgende Annahmen getroffen:

- Lebensdauer Filteranlagen 20 Jahre (8400 h/a)
- Diskontsatz 1,00 %
- Verbraucherpreisindex (Inflationsrate) 1,7 % [96]
- Industriestrompreis 2017: 0,1712 €/kWh [78]
- Druckluftkosten 0,03 €/Nm³
- Wartungsaufwand 5 % (Schlauchfilter), 10 % (Rotationsentstauber) [54]

Tabelle 9: Lebenszykluskosten Rotationsentstauber – Schlauchfilter (Details siehe Anhänge 15a-b)

Position	Schlauchfilter	Rotationsentstauber
Investition	79.745,80 €	213.338,80 €
Strom	1.920.413,64 €	1.835.302,64 €
Druckluft	412.720,30 €	1.968.188,01 €
Instandhaltung & Filtermittel	105.740,74 €	516.415,65 €
Rückbau	8.195,44 €	12.293,17 €
Summe	2.526.815,92 €	4.545.519,26 €

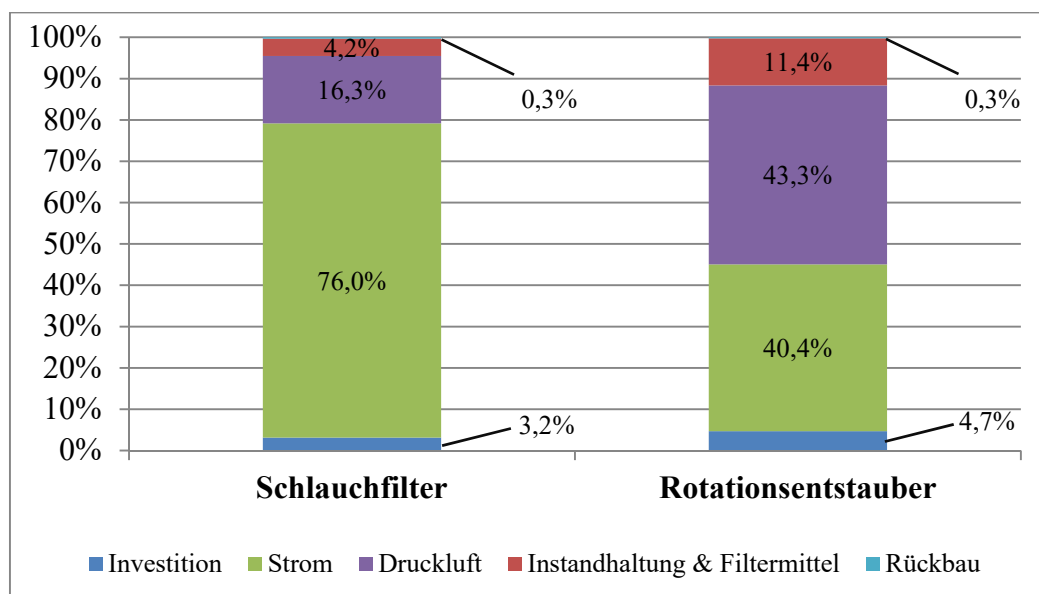


Bild 54: Verteilung Lebenszykluskosten Rotationsentstauber - Schlauchfilter

Aus Tabelle 9 und Bild 54 wird deutlich, dass die Investitionskosten trotz erheblicher Unterschiede zwischen Rotationsentstauber und Schlauchfilter nur einen geringfügigen Anteil an den Lebenszykluskosten haben. Auch der Rückbau des Filters ist nahezu vernachlässigbar. Dominant sind bei beiden Filtern die Energiekosten für Strom und Druckluft, welche in Summe für den Rotationsentstauber 83,7 % und für den Schlauchfilter 92,3 % betragen. Durch die Prozessführung weist der Rotationsentstauber trotz des zusätzlichen Antriebmotors für die Trommelrotation einen geringfügigeren Stromverbrauch auf als der Schlauchfilter. Die häufigere Regenerierung der Filtermittel verursacht jedoch auch erheblich höhere Druckluftkosten des Rotationsentstaubers, die durch die Stromeinsparung nur anteilig kompensiert werden können. Durch die aufwändige Konstruktion und Prozessführung des Rotationsentstaubers wurden auch die zu erwartenden Kosten für Instandhaltung und Filtermittel im Vergleich höher angesetzt. Der Austausch der Filtermittel wurde dabei mit den reinen Beschaffungskosten zzgl. Kosten für deren Austausch kalkuliert.

Abschließend kann konstatiert werden, dass der Ansatz des Rotationsentstaubers gegenüber konventionellen Oberflächenfiltern aktuell nicht konkurrenzfähig ist, da ca. 80 % höhere Lebenszykluskosten anfallen. Zur Berücksichtigung allgemeiner, gesellschaftlicher Kosten durch erhöhte (Fein)staubemissionen existieren keine kalkulatorischen Grundlagen. Dennoch steht fest, dass erhöhte Emissionswerte des Rotationsentstaubers im Kontext internationaler Umweltziele nicht akzeptabel sind. Rein ökonomisch betrachtet scheitert der Rotationsentstauber an hohen Druckluft- und Instandhaltungskosten. Eine Verringerung dieser Kosten durch weitere Entwicklungsarbeiten ist realistisch jedoch nicht zu empfehlen, da das Kosten- und Emissionsniveau eines Schlauchfilters voraussichtlich nicht erreicht wird. Ein wirtschaftlicher Betrieb des Rotationsentstaubers kann somit nicht in Aussicht gestellt werden.

6 Oberflächenfilter im Spannungsfeld Industrie 4.0

Eine zentrale Aufgabe für den Wirtschaftsstandort Deutschland stellt die Digitalisierung der Wirtschaft und Gesellschaft unter dem Oberbegriff *Industrie 4.0* dar. Dies ergibt sich aus der Hightech-Strategie der Bundesregierung [97] und wirkt sich erheblich auf gesellschaftliche Entwicklungen aus. Dieser Wandel der Industriegesellschaft mit Steigerung der Produktivität durch Optimierung gesamter Wertschöpfungsketten ist zwingend notwendig zur Erhaltung und zum Ausbau der Wettbewerbsfähigkeit des Standortes Deutschland. Zur zukunftssicheren Ausrichtung jedes Wirtschaftszweiges, Maschinentyps oder Prozesses müssen die sich dadurch ergebenden Chancen und Risiken individuell abgewogen werden. Im Ergebnis dieser Beurteilung sollte eine Strategie abgeleitet werden, mit der den anstehenden Herausforderungen zielgerichtet begegnet werden kann. Derartige Strategien existieren im Moment vorrangig für Großunternehmen und Hightech-Branchen.

Ziel dieses Kapitels ist deshalb das Aufzeigen des Potenzials einer Automatisierung und Digitalisierung von Oberflächenfiltern im Spannungsfeld Industrie 4.0 zur Effizienzsteigerung und Reduzierung der Lebenszykluskosten. Dazu ist zunächst eine Klärung wesentlicher Begriffe notwendig, um ein einheitliches Verständnis zu entwickeln (Kapitel 6.1). Die Möglichkeiten smarter Oberflächenfilter werden in Kapitel 6.2 diskutiert. Durch die stärkere Korrelation von Anlagen- und Prozessdaten wird ein verbessertes Verständnis der Oberflächenfiltration gefördert. Anhand einer Branchenübersicht mit ausgewählten *Best Practice*-Beispielen wird der Status quo erläutert. Einen besonderen Stellenwert nehmen dabei moderne Instandhaltungsmethoden ein, welche eine hohe Anlagenverfügbarkeit bei kontinuierlicher Überwachung der Funktionalität ermöglichen. Die Ausführungen ergänzen gezielt die Auslegung und den Betrieb effizienter Oberflächenfilter (Kapitel 4) sowie ihre Wechselwirkungen untereinander. In Kapitel 6.3 werden Errichtern und Betreibern von Oberflächenfiltern Handlungsempfehlungen zur Weiterentwicklung ihrer Anlagen zu smarten, zukunftssicheren Filtern gegeben.

6.1 Begriffsklärung

Neben den vielfältigen technischen Herausforderungen stellt sich für viele speziell kleine und mittlere Unternehmen das grundsätzliche Problem, einen Bezug zum Megatrend Industrie 4.0 zu entwickeln. Noch immer existiert kein umfassendes Verständnis für neue, einschlägige Be-

griffe in diesem Kontext. Nachstehend werden deshalb ausgewählte Begriffe erläutert, um ein einheitliches Verständnis des Spannungsfeldes Industrie 4.0 zu fördern.

Industrie 4.0

Unter dem Begriff *Industrie 4.0* kann die Weiterentwicklung der Produktion unter intensiver Nutzung digitaler Informationstechnologie zusammengefasst werden. Nach der von England im 18. Jahrhundert ausgehenden industriellen Revolution durch Mechanisierung, der Massenproduktion, die im frühen 20. Jahrhundert stark mit Henry Ford und den USA verbunden ist, sowie die im weiteren Verlauf den 20. Jahrhunderts rasant fortschreitende Automatisierung von Produktionsprozessen wird die *Industrie 4.0* auch als vierte industrielle Revolution angesehen. Fertigungsprozesse wurden im Zuge dieser Entwicklungen stets komplexer, was maßgeblich mit bahnbrechenden Innovationen verbunden werden kann (Bild 55). Diese Evolution der Fertigungsprozesse führte zum aktuellen Fokus auf Transparenz. Dabei findet eine Vereinigung der realen und virtuellen Welt einer automatisierten Massenproduktion mit höchsten Qualitätsansprüchen ab Losgröße 1 statt. Zukünftig werden Mensch, Maschine, Anlage und Prozess nicht mehr autark sondern ganzheitlich betrachtet und intelligent miteinander vernetzt sein. Der Mensch in seiner unveränderten Schlüsselrolle wird durch die Technik aktiv unterstützt.

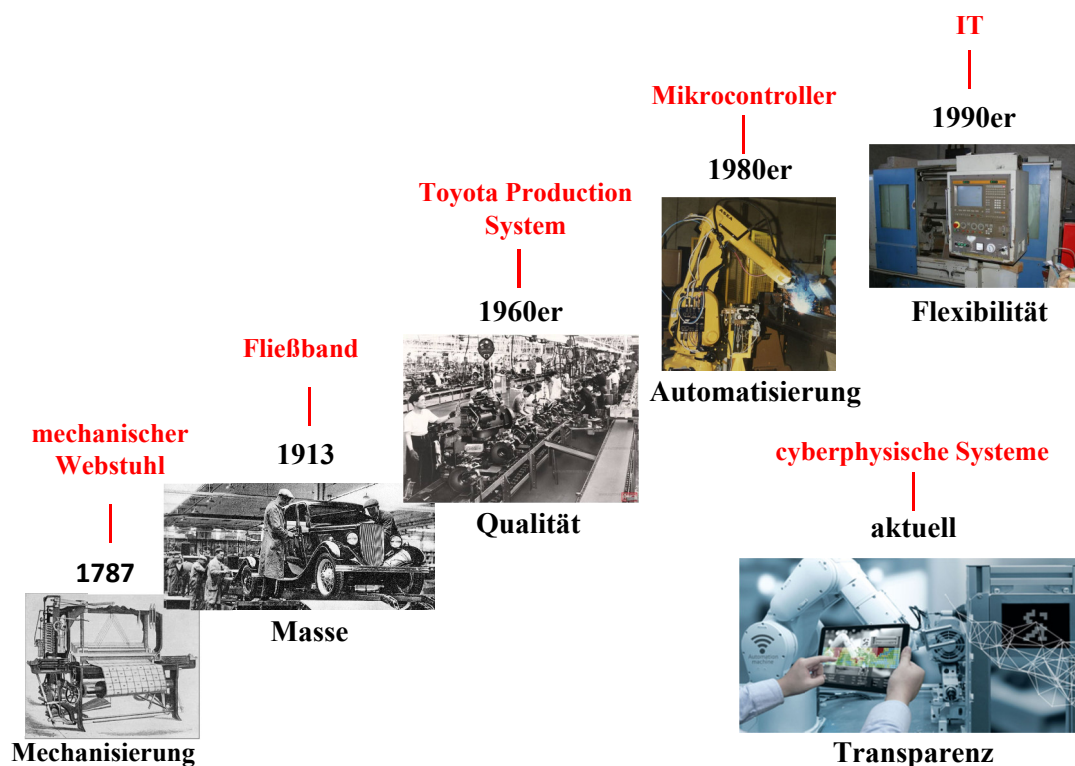


Bild 55: Evolution von Fertigungsprozessen

Internet of Things (IoT)

Der eng mit *Industrie 4.0* verbundene Begriff steht für die Verknüpfung realer (physisch vorhandener) und virtueller Welten. Diese Vision ermöglicht eine uneingeschränkte Kommunikation und Interaktion verschiedener Technologien untereinander sowie mit dem Menschen. Assistenzsysteme werden dazu befähigt, den Menschen zu unterstützen.

Big Data

Durch moderne Informationsquellen wie z.B. das Internet, Datenbanken oder Sensoren erzeugte Datenmengen können gigantische Ausmaße annehmen. Ohne spezifische Auswertelgorithmen besitzen diese Daten wenig Nutzen.

Data Mining

Ziel des *Data Mining* ist die Extraktion wesentlicher Informationen aus großen Datenmengen (*Big Data*). Rechnergestützt und mit mathematischen Methoden stellt dieser Vorgang einen Erkenntnisgewinn dar und dient damit als entscheidende Voraussetzung zur Nutzung des Potenzials von *Industrie 4.0*.

Smarte Technologie / Smart Maintenance

Im Gegensatz zu herkömmlicher Technologie nutzt smarte Technologie das Potenzial von *Industrie 4.0*, woraus künstliche Intelligenz hervorgehen kann (*cyber-physische Systeme*). Selbstlernende und in Echtzeit kommunizierende Systeme können damit einen Teil menschlicher Fähigkeiten und Fertigkeiten maschinell abbilden. Ein Ersatz des Menschen ist jedoch auch durch smarte Technologie nicht möglich. Klassische Instandhaltungsstrategien mit den Kernelementen Instandsetzung, Wartung und Inspektion müssen zur Handhabung smarter Technologien zur Smart Maintenance weiterentwickelt werden. Dabei verschieben sich die Aktivitäten zunehmend in Richtung IT-basierter und planender Schwerpunkte [98]. Durch umfangreiche Nutzung sensorischer Daten ist es dabei möglich, den Aufwand für Instandhaltungsaktivitäten durch automatisierte und parallel stattfindende Abfolgen erheblich zu senken. Optimierungsziele sind die Maximierung der Anlagenverfügbarkeit bei minimalem Aufwand. Komponenten werden erst getauscht, wenn ihre Funktionalität nicht mehr gegeben ist. Bestehende Instandhaltungskonzepte können diesen Anforderungen meistens nicht gerecht werden [99 p. 3].

6.2 Eigenschaften smarter Oberflächenfilter

Die Stellung smarter Oberflächenfilter im Kontext einer Industrie 4.0-Fertigung zeigt Bild 56. Auf der untersten Ebene (Komponentenebene) geben wesentliche Komponenten des Oberflächenfilters fortlaufend Zustandsmeldungen ab, anhand derer dessen Gesamtperformance beurteilt werden kann. Die Prozessführung auf Anlagenebene orientiert sich an vor- und nachgeschalteten Prozessen (dynamische Prozessführung). Der Zustand des Filters mit Anpassung an die jeweiligen Fertigungsbedingungen wird auf Fertigungslinien- bzw. Werksebene angezeigt. Ein stetiger Informationsaustausch zwischen allen Ebenen schafft Transparenz und erkennt damit z.B. drohende Ausfälle rechtzeitig, um präventiv zu agieren. Im Gegensatz zum autarken Filterbetrieb können Verfügbarkeit, Energie- und Abscheideeffizienz entscheidend gesteigert werden. Smarte Filter besitzen somit auf Grundlage nachfolgender Eigenschaften einen entscheidenden ökonomischen und ökologischen Wettbewerbsvorteil, der zukünftig noch stärker an Bedeutung gewinnen wird.

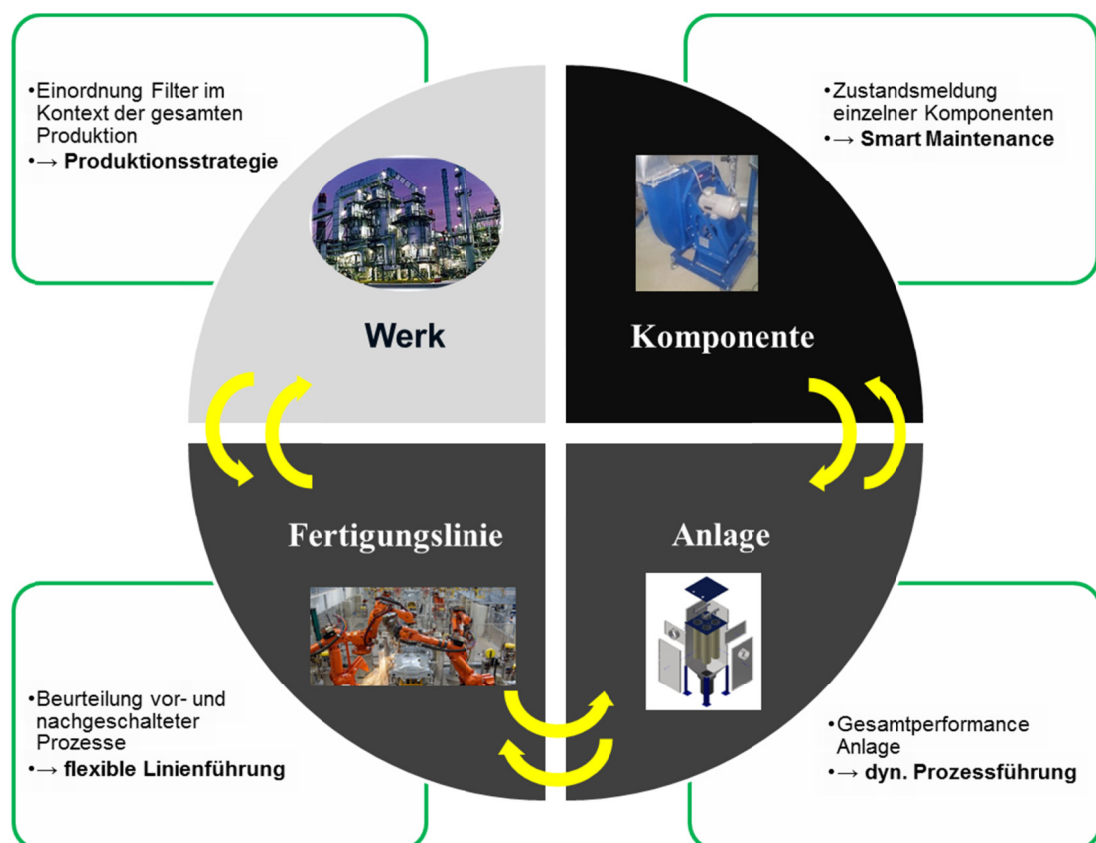


Bild 56: Anforderungen an smarte Oberflächenfilter

6.2.1 Smart Maintenance

Die Instandhaltung verursacht nach VDI-Richtlinie 2264 [54] jährliche Kosten in Höhe von ca. 3-7 % des Wiederbeschaffungswertes der Anlage. Ziel ist es dabei, die Funktionalität der Anlage (Nutzungsvorrat) möglichst lange auf hohem Niveau zu halten. Stand der Technik ist eine planmäßige, vorbeugende Wartung, wozu entsprechend Tabelle 10 verschiedene Strategien existieren, die um Smart Maintenance erweitert wurden. Eine Smart Maintenance stellt eine Weiterentwicklung konventioneller Methoden dar, die über den Instandhaltungscharakter hinaus einen effizienten und kostenminimierten Anlagenbetrieb ermöglicht.

Tabelle 10: Vor- und Nachteile unterschiedlicher Instandhaltungsstrategien [54]

Strategie	Vorteile	Nachteile
ungeplante Instandhaltung (Instandsetzung)	kein Wartungs- und Inspektionsaufwand	hohe Instandsetzungskosten Downtime schlecht planbar
vorbereitende Instandhaltung	geringe Instandhaltungskosten	hoher organisatorischer Aufwand Downtime schlecht planbar
planmäßige Instandhaltung (Wartung)	hohe Anlagenverfügbarkeit Downtime gut planbar	hohe Instandhaltungskosten keine Berücksichtigung von Anlageneigenarten kein Erfahrungsgewinn
Smart Maintenance	hohe Anlagenverfügbarkeit geringe Instandhaltungskosten Downtime gut planbar Erfahrungsgewinn	hoher Investitionsaufwand umfangreiche Kompetenz

Es zeigt sich, dass keine Instandhaltungsstrategie frei von Nachteilen ist. Unter den für die Produktion entscheidenden Gesichtspunkten Anlagenverfügbarkeit, Planbarkeit und Instandhaltungskosten bietet die Smart Maintenance entscheidende Vorteile und ist damit als Instandhaltungsstrategie der Zukunft zu betrachten. Als Nachteile sind ein hoher Investitionsaufwand und die umfangreiche Kompetenz als Voraussetzung für die Implementierung smarter Technologie zu nennen. Diese Nachteile beschränken sich jedoch auf die Phasen der Auslegung, des Baus und der Inbetriebnahme der Filteranlage. Für die Betriebsphase des Filters, die einen entscheidenden Anteil an den Lebenszykluskosten trägt, ergeben sich jedoch entscheidende Vorteile, die eine Amortisation der erhöhten Investitionskosten ermöglichen. Das Potenzial der Smart Maintenance lässt sich in vier Hauptgruppen unterteilen, die anhand von Bild 57 diskutiert werden.

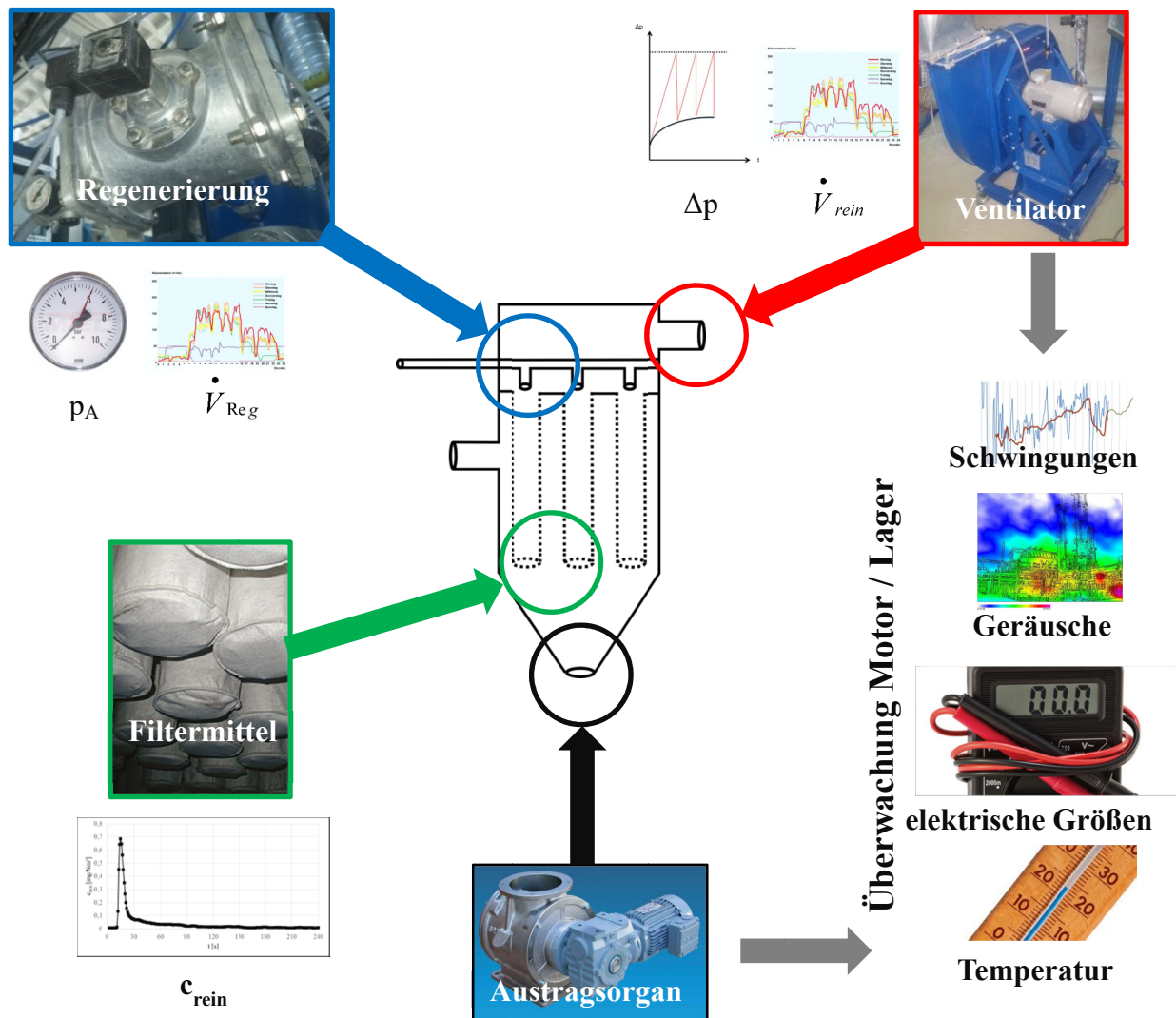


Bild 57: Smart Maintenance bei Oberflächenfiltern

Regenerierung

Eine Smart Maintenance kann einen Beitrag zur effizienten Regenerierung des Filtermittels leisten. Neben dem Einsatz hochwertiger Ventiltechnik (siehe Kapitel 4.3.3) müssen dazu die Intensität und die Häufigkeit der Regenerierung auf ein notwendiges Maß beschränkt werden. Mit einer differenzdruckgesteuerten Betriebsweise wird die Regenerierungshäufigkeit auf ein Minimum begrenzt (siehe Kapitel 2.4.3). Hinsichtlich Regenerierungsintensität besteht jedoch noch ein erhebliches Optimierungspotenzial, um die Intensität ebenfalls auf ein notwendiges Minimum zu beschränken. Eine Möglichkeit zur Nutzung dieses Potenzials bietet eine rest-druckverlustgesteuerte Regenerierung entsprechend Bild 58. Dabei erfolgt eine bedarfsgerechte (dynamische) Anpassung des Regenerierungsdrucks p_{Reg} in Abhängigkeit des Restdruckverlusts mit positiven Auswirkungen auf den Druckluft- und Stromverbrauch, Staubemissionen und Fil-

termittelalterung. Das dazu benötigte elektronische Manometer mit Stellantrieb ermöglicht darüber hinaus die Überwachung des Druckniveaus als Nachweis für das Anliegen des benötigten Druckluftniveaus. Der Anlagenbetreiber definiert zunächst den Restdruckverlust Δp_R , dessen experimentelle Bestimmung schwierig ist. Zur Vereinfachung wird empfohlen, hierfür den zu einem definierten Zeitpunkt nach der Filtermittelregenerierung gemessenen Differenzdruck anzusetzen. Anschließend ist die Festlegung eines oberen (max) und unteren Schwellenwertes (min) für den Restdruckverlust erforderlich, ab der die Regenerierungsintensität angepasst wird. Bei einem Restdruckverlust zwischen beiden Schwellenwerten ist keine Anpassung des Regenerierungsdruckes erforderlich (Optimum). Wird der obere Schwellenwert überschritten, erfolgt eine Erhöhung des Regenerierungsdrucks; dessen Verringerung wird nach Unterschreitung des unteren Schwellenwertes initiiert.

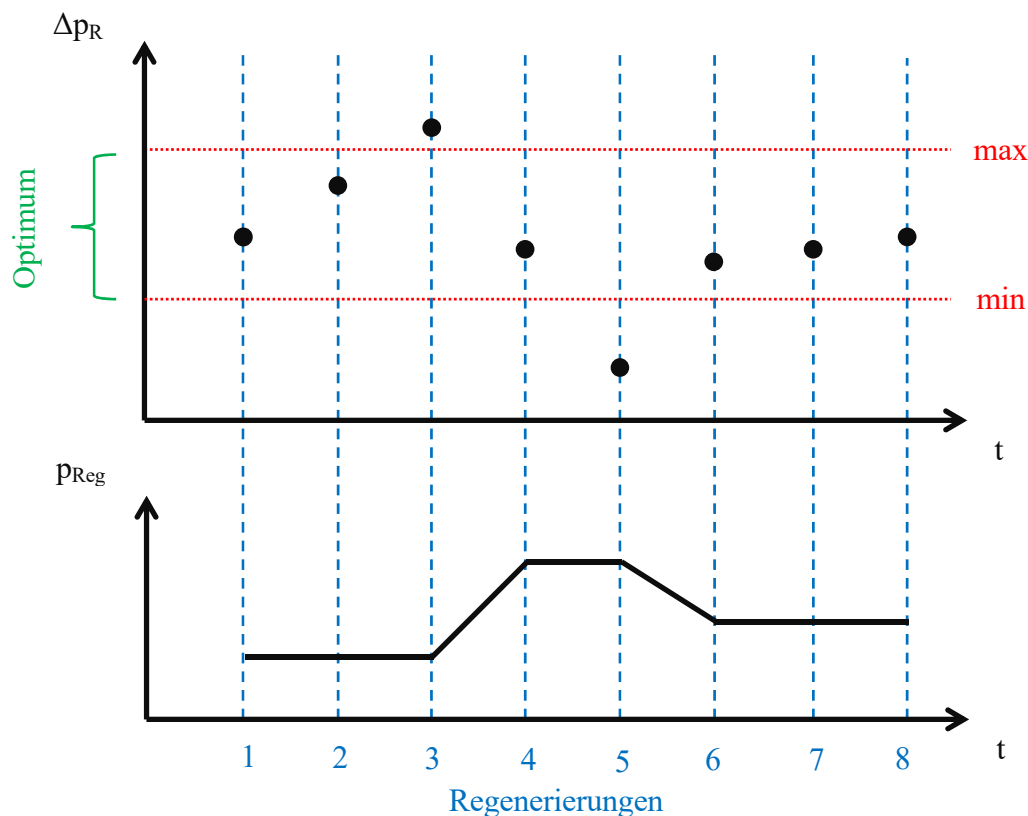


Bild 58: Charakteristik einer restdruckverlustgesteuerten Filtermittelregenerierung

Das in Bild 58 abgebildete Beispiel zeigt im Ergebnis der ersten beiden Regenerierungen einen Restdruckverlust zwischen dem oberen und unteren Schwellenwert. Der Regenerierungsdruck wird somit konstant gehalten. Bedingt durch die Überschreitung des oberen Schwellenwertes nach der dritten Regenerierung wird das Druckniveau angehoben und gehalten. Nach Unter-

schreitung des unteren Schwellenwertes infolge Regenerierung 5 wird das Druckniveau auf einen hinsichtlich Restdruckverlust geeigneten Wert abgesenkt.

Auch Leckagen des Druckluftsystems können durch einen steigenden Volumenstrom erkannt werden, welcher über geeignete Zeitintervalle (Tage, Wochen) ausgewertet wird. Lassen sich signifikante Veränderungen nicht auf Prozesseinflüsse zurückführen, liegen Undichtigkeiten vor, die auch mit messtechnischer Unterstützung z.B. akustisch lokalisiert werden können. Das ordnungsgemäße mechanische Öffnen und Schließen der Ventiltechnik entsprechend der elektronischen Vorgabe lässt sich aus der Überwachung der Reingasstaubkonzentrationen ableiten (siehe Filtermittel nachstehend).

Filtermittel

Die Dichtigkeit und Eignung des Filtermittels kann mittels kontinuierlicher Messung der Reingasstaubkonzentration beurteilt werden. Eine ideale Regenerierung des Filtermittels zeichnet sich durch den charakteristischen Anstieg der Reingasstaubkonzentration direkt im Anschluss an die Filtermittelregenerierung aus (Typ 1 Bild 59). Unmittelbar danach sinkt die Rohgasstaubkonzentration wieder auf ein verhältnismäßig geringes Niveau ab.

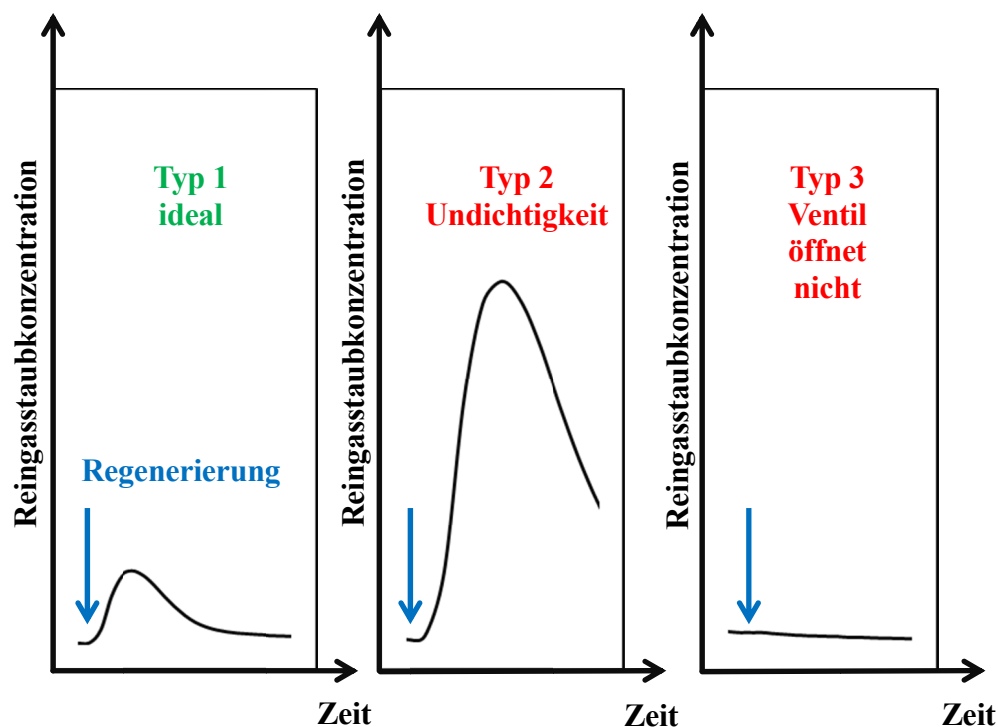


Bild 59: Überprüfung Filtermitteldichtigkeit und -regenerierung

Prozessbedingt unterliegt dieses Verhalten statistischen Schwankungen, weicht aber qualitativ nicht vom skizzierten Verlauf ab. Bei beschädigtem Filtermittel oder unzureichender Abdichtung zwischen Roh- und Reingasseite gelangt mehr Staub auf die Reingasseite (Typ 2). Eine Abdichtung dieses Defekts durch anfiltrierten Staub ist dennoch möglich. Nicht öffnende Ventile verhindern die Regenerierung des Filtermittels. Die Reingasstaubkonzentration bleibt infolge des noch vorhandenen Staubkuchens auf einem verhältnismäßig niedrigem Niveau (Typ 3). Durch Korrelation des regenerierten Filterelements bzw. der regenerierten Reihe mit der Reingasstaubkonzentration ist eine Eingrenzung der betroffenen Filterelemente möglich, die daraufhin schnell und gezielt ausgetauscht werden können.

Ventilator

Für eine konstante Filterflächenbelastung ist eine Messung und Regelung des Volumenstroms erforderlich. Die erfassten Daten geben Rückschluss auf die Funktionalität des Ventilators und dokumentieren den emittierten Volumenstrom. Kombiniert mit den Messwerten der Reingasstaubkonzentration können die Schadstofffrachten quantifiziert werden. Auch die essenzielle Überwachung des Differenzdrucks zwischen Roh- und Reingasseite bildet den funktionalen Zustand des Ventilators ab. Darüber hinaus bieten die Differenzdruckverläufe einen entscheidenden Einblick in den Oberflächenfiltrationsprozess, der bereits hinreichend erläutert wurde (Kapitel 2.4.2 und 2.4.3).

Häufige Ursachen für Anlagenstillstände sind auf Verschmutzung, Verschleiß oder Korrosion des Lüfterlaufrades sowie des Elektromotors zurückzuführen. Drohende Ausfälle deuten sich dabei oft bereits frühzeitig an, werden jedoch selten erkannt. Als Indikatoren können Schwingungen, Geräuschentwicklung, Temperatur oder elektrische Größen wie die Leistungsaufnahme herangezogen werden. Lassen sich Erhöhungen oder starke Schwankungen nicht prozesstechnisch erklären, kündigen diese den Komponentenausfall an. Speziell aus dem Anwendungsbereich der Turbomaschinen sind Methoden der Schwingungsüberwachung bereits etabliert [100,101, 102]. Neben einschlägigen Erfahrungswerten existieren mit der DIN ISO 20816 auch normative Vorgaben zur Messung und Bewertung von Maschinenschwingungen. Auch schwer zugängliche Stellen können hinsichtlich auffälliger Geräuschentwicklungen mit Stethoskopen inspiziert werden. Gleiches trifft auf die Lagertemperaturen zu, dessen Zunahme ebenfalls ein Indiz für technische Probleme ist.

Austragsorgan

Analog zum Lüfter können auch die Probleme mit der Lagerung rotierender Austragsorgane einschließlich Elektromotoren (z.B. Förderschnecken, Zellenradschleusen) mit Hilfe der Indikatoren Schwingungen, Geräuschentwicklung, Temperatur oder elektrische Größen wie Leistungsaufnahme identifiziert werden. Bei Doppelpendelklappen ist das ordnungsgemäße Öffnen und Schließen mittels Endlagenabfrage eindeutig nachweisbar. Vorteile dieser Früherkennung von Problemen sind spezifisch höhere Anlagenverfügbarkeiten.

6.2.2 Big Data, Data Mining und Informationsaustausch

Zur Nutzung der Vorteile von Smart Maintenance bei Oberflächenfiltern müssen die großen Datenmengen auf Komponentenebene (*Big Data*) entsprechend Bild 60 mittels spezifischer Auswertelgorithmen auf wesentliche Informationen komprimiert werden (*Data Mining*).

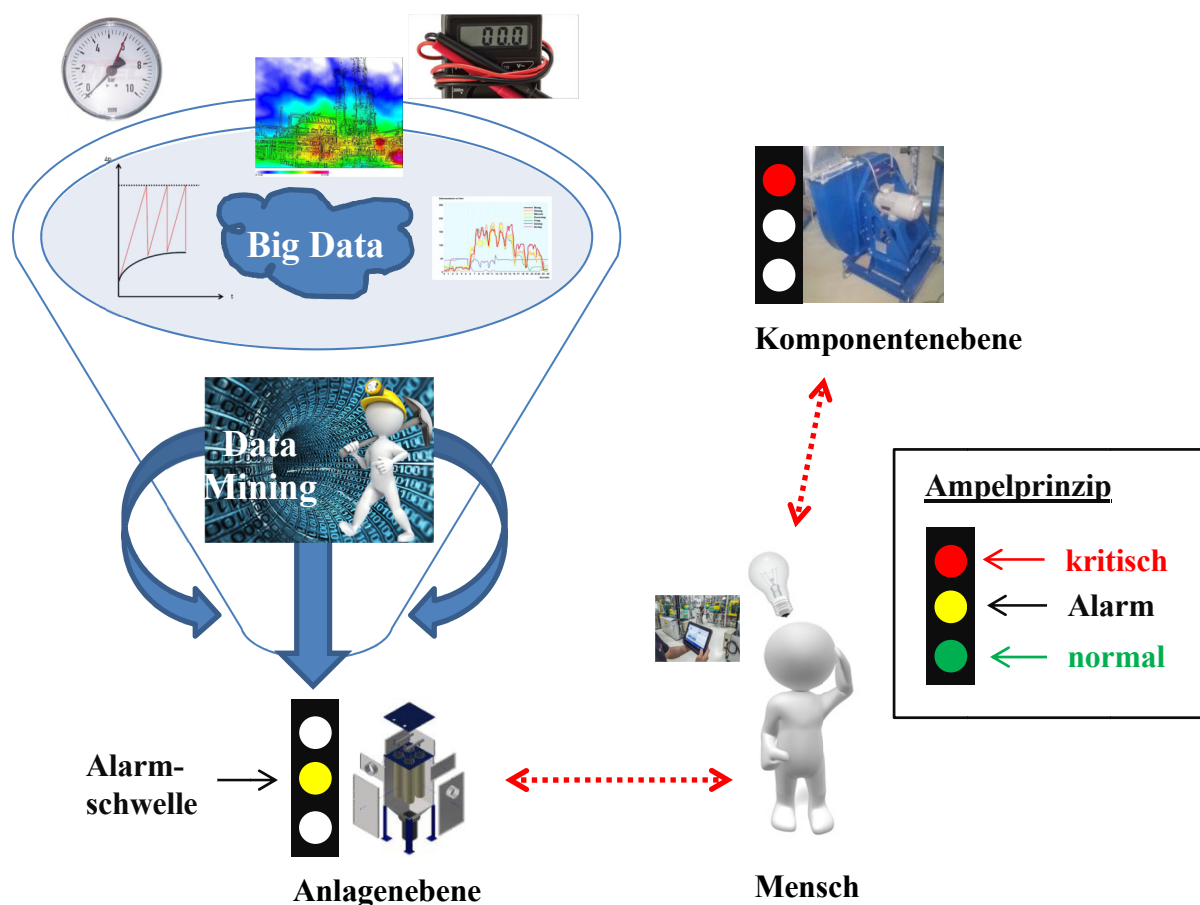


Bild 60: Big Data und Data Mining bei smarten Oberflächenfiltern

Für jede Komponente sind dazu mindestens drei unterschiedliche Betriebszustände nach dem Ampelprinzip zu definieren. Zunächst betrifft dies einen Normalzustand (grün). Abweichungen davon überschreiten zunächst eine Alarmschwelle (gelb). Kritische Betriebszustände, die zu Produktionsausfällen führen können, besitzen eigene Abbruchschwellen (rot). Aus den hinterlegten Betriebszuständen können bei Überschreitung der Alarm- oder Abbruchschwelle Aktivitäten abgeleitet werden. Auf Grundlage der durch Smart Maintenance gewonnenen Messdaten (Kapitel 6.2.1) ergeben sich folgende Empfehlungen zum Data Mining smarter Oberflächenfilter, welche in Tabelle 11 anhand ausgewählter Messwerte qualitativ gegenübergestellt werden. Quantitative Aussagen sind nicht möglich, da jeder Oberflächenfilter individuell beurteilt werden muss.

Tabelle 11: Empfehlung zum Data Mining smarter Oberflächenfilter

Messwert	Algorithmus	Nutzen
Rohgasstaubkonzentration	Mittelwertbildung über unterschiedliche Zeitintervalle	Massestrombilanzierung, Berechnung Gesamtabscheidegrad
Reingasstaubkonzentration		Überprüfung Staubemissionen, Leckageerkennung Filtermittel , Massestrombilanzierung, Berechnung Gesamtabscheidegrad
Rohgasvolumenstrom		Volumenstrombilanzierung
Reingasvolumenstrom		
Klimadaten	Normierung Volumenströme	Vergleichbarkeit von Messdaten
Differenzdruckverlauf	Auftragung über Zeit bzw. Staubflächenmasse, Berechnung Anstieg (linear, progressiv, degressiv)	Beurteilung Prozessstabilität
Restdruckverlust	Auftragung über Standzeit Filtermittel	Entscheidungshilfe zum Austausch der Filtermittel , dynamische Regenerierung
Partikelgrößenverteilung Rohgas	Auftragung der Partikelanzahl über Partikelgrößenklassen	Berechnung Fraktionsabscheidegrad
Partikelgrößenverteilung Reingas		Berechnung Fraktionsabscheidegrad, Beurteilung der physiologischen Wirkung von Feinstäuben
Druckluftvolumenstrom	Korrelation mit Rohgasstaubkonzentration, Mittelwertbildung über unterschiedliche Zeitintervalle	Leckageerkennung Abreinigungssystem, Bilanzierung Druckluftverbrauch
Regenerierungsdruck	Abgleich SOLL-IST	Überwachung Druckluftbereitstellung
Leistungsaufnahme Ventilator	Auftragung über Zeit, Korrelation mit Differenzdruckverlauf	Bilanzierung Stromverbrauch
Leistungsaufnahme Ausstragsorgan	Auftragung über Zeit	

Tabelle 11 (Fortsetzung): Empfehlung zum Data Mining smarter Oberflächenfilter

Messwert	Algorithmus	Nutzen
Schwingungen Ventilator / Austragsorgan	Schwingungsanalyse	Zustandsbeurteilung (Verschmutzung, Verschleiß)
Geräusche Ventilator / Austragsorgan	Auftragung über Zeit	
elektrische Größen Ventilator / Austragsorgan	Auftragung über Zeit (z. B. Leistungsaufnahme)	
Lagertemperatur Ventilator / Austragsorgan	Auftragung über Zeit	

In Tabelle 11 fett markierte Messwerte sowie der daraus zu ziehende Nutzen sind von herausragender Bedeutung und in vielen Fällen verhältnismäßig leicht und kostengünstig zu ermitteln. Allein für die hervorgehobene Messung der Reingasstaubkonzentration wird ein zusätzliches Messgerät benötigt. Der Differenzdruckverlauf sowie der Restdruckverlust lassen sich anhand der Differenzdruckmessung ermitteln, die nach Stand der Technik Bestandteil jedes Oberflächenfilters ist. Zur Erfassung des Druckluftvolumenstroms können in vielen Fällen Daten genutzt werden, die bereits seitens Druckluftherzeugung durch übergeordnete Steuerungen an Kompressorstationen existieren. Die Leistungsaufnahme des Ventilators lässt sich über Schaltschränke oder Frequenzumrichter objektiv ermitteln. Für die Überwachung des Ventilators und des Austragsorgans können Standardgeräte genutzt werden.

Auf Anlagenebene fließen die Betriebszustände zusammen, woraus sich die Performance des Filters ableitet. Diese Informationen werden an die Ebene der Fertigungslinie und darüber hinaus auch an die Werksebene übermittelt. Auf jeder höheren Hierarchieebene kann somit die jeweils untergeordnete Funktionseinheit nach dem Ampelprinzip einfach beurteilt werden. Probleme auf einer Ebene führen nicht zwangsläufig zu Problemen auf einer anderen Ebene, werden aber umgehend erkannt und können behoben werden. Eine Filterabschaltung kann infolge Überschreitung immissions- oder arbeitsschutzrechtlicher Grenzwerte erforderlich sein und zum Ausfall einer gesamten Produktionslinie führen. Bei Filtern, die der Produktgewinnung dienen, führt dies auch zur Unterbrechung der Materialversorgung nachgeschalteter Prozessstufen. Zwischen allen Ebenen ist ein Datenaustausch möglich. Seitens der jeweils höheren Ebene ist ein Durchgriff bis auf die unterste Ebene möglich, um Probleme zu begutachten. Unteren Ebenen genügt i. d. R. eine Statusmeldung übergeordneter Ebenen, die zu einer Abschaltung von Anlagen führen können.

Der steigende Informationsfluss ermöglicht auch neuartige Nutzungsmöglichkeiten für Filter. So kann der Staubbunker von Oberflächenfiltern, die der Produktgewinnung dienen, als Puffer und das Austragsorgan zur Dosierung von Staub verwendet werden, falls es zur Störung nachgeschalteter Prozessstufen kommt. Eine angepasste Steuerung und Regelung der Austragsorgane vermeidet unnötige Anlagenstillstände. Anhand des Differenzdrucks können auch vorgegeschaltete Prozessstufen überwacht werden. Veränderte Rohgasstaubkonzentrationen oder Staubeigenschaften wirken sich auf den Druckverlust des Filters aus, der zum Frühwarnsystem aufgewertet wird. Je nach Rohgaseigenschaften kann der Filter dynamisch betrieben werden. Dies betrifft eine bedarfsgerechte Filtermittelregenerierung, die u. a. bereits anhand von Bild 58 erläutert wurde. Weitere sensorgestützte Eingriffsmöglichkeiten zum Schutz des Filters sowie vor- und nachgeschalteter Prozessstufen existieren in der Brand- und Explosionserkennung oft i. V. m. automatischen Löscheinrichtungen.

Die Entwicklungen der Sensortechnik ermöglichen z. T. bereits eine eigenständige Energiegewinnung für den Sensor an rotierenden Bauteilen. Robuste Systeme, die zunehmend unempfindlich gegenüber Umwelteinwirkungen wie z.B. Staub, Schmutz, Vibrationen oder elektromagnetischen Feldern sind, verbreiten sich rasch am Markt und erleichtern damit die Einrichtung automatisierter Messstellen. Der Trend zur Miniaturisierung sowie die Integration der Auswerteelektronik in die Sensoren erleichtert deren Nutzung. Bereits durch die Sensortechnik komprimierte Rohdaten mit geringem Datenvolumen können kabelgebunden oder drahtlos nahezu in Echtzeit ausgewertet und übertragen werden. Durch den sinkenden Preis für Sensortechnik verbessert sich die Wirtschaftlichkeit smarter Technologie stetig.

Der Austausch von Daten zwischen den unterschiedlichen Ebenen, Komponenten und Messgeräten sollte über standardisierte Schnittstellen und Kommunikationsprotokolle ablaufen. Die Konnektivität stellt eine essentielle Voraussetzung für eine *Smart Maintenance* dar. In Anbetracht des vielfältigen Marktes sollten Unternehmen sich deshalb frühzeitig auf Standards festlegen, welche im Zuge der Beschaffung, Nach- oder Umrüstung von Anlagen angewandt werden. Auch die Datenübermittlung an mobile Endgeräte (z.B. Smartphone, Tablet), Informations- und Servicesysteme oder eine Cloud einschließlich Auswertung sind möglich, um dem Anlagenbetreiber eine effektive Nutzung der zusätzlichen Informationen zu erleichtern.

Aus einer reaktiven Instandhaltung, die erst auf Ausfälle oder turnusmäßige Inspektionen reagiert, wird eine proaktive *Smart Maintenance* mit kontinuierlicher Anlagenüberwachung, welche Komponenten erst tauscht, wenn es notwendig ist. Die Kosten werden damit minimiert;

Anlagenstillstände lassen sich gut planen. Mit der Korrelation von Betriebszuständen mit Schadensbildern an Komponenten können wertvolle Erfahrungswerte gewonnen werden, die zukünftige Investitionsentscheidungen im Sinne minimierter Lebenszykluskosten beeinflussen.

6.2.3 Risiken

Den nahezu unbegrenzten Möglichkeiten von Industrie 4.0 stehen erhebliche Risiken gegenüber. Mit der Intelligenz von Produkten steigt auch deren Komplexität. Dies betrifft die Entwicklung, Herstellung, Integration und Nutzung zahlreicher Hightech-Produkte (u. a. Sensoren, Steuer- und Regeltechnik, Software). Allein der immens gestiegene Programmieraufwand führt bereits heute zu einem akuten Fachkräftemangel am Arbeitsmarkt speziell für Informatiker mit Bezug zu thematischen Schwerpunkten im Spannungsfeld Industrie 4.0. Die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen mit Problemen bei der Fachkräftegewinnung verringert sich.

Bei der Nachrüstung speziell älterer Systeme muss ein besonderer Fokus auf Sicherheitsaspekte gelegt werden, da die Anzahl cyber-basierter Angriffe auf industrielle Steuerungssysteme zunimmt und diesbezüglich noch kein ausreichendes Schutzniveau erreicht ist [103]. Speziell der Fernzugriff auf Filteranlagen durch den Hersteller zur zielgerichteten Bereitstellung von Instandhaltungsdienstleistungen sollte strikt reglementiert werden.

6.3 Handlungsempfehlungen für zukunftssichere Oberflächenfilter

Im Spannungsfeld Industrie 4.0 werden wesentliche Zukunftsthemen adressiert, um die Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandorts Deutschland in einem internationalen Umfeld zu erhalten und auszubauen. Das Potenzial smarter Oberflächenfilter wird bisher oft nicht genutzt. Bezug nehmend auf die vorliegende Arbeit enthält Bild 61 die Empfehlung einer Roadmap zur Errichtung und zum Betrieb smarter und damit zukunftssicherer Oberflächenfilter. Zukunftssichere Oberflächenfilter zeichnen sich dabei durch geringe Lebenszykluskosten aus.

Charakteristische Facetten der Technologielevel Low-Tech-, Medium-Tech- oder Industrie 4.0, dessen Übergänge fließend sind, werden dabei getrennt nach Errichtungs- und Betriebsphase aufgeführt. Die Rahmenfarbe gibt Aufschluss darüber, in welchem Themengebiet dieser Arbeit diese Facette behandelt wird. Unterteilt wird dabei in die Auslegung (rot) und den Betrieb (blau) effizienter Oberflächenfilter (beide Kapitel 4) sowie deren Weiterentwicklung zu smarten Oberflächenfiltern (grün, Kapitel 6). Jedem Anwender soll die Arbeit als Leitfaden und Orientierung dienen, um daraus eine eigene Strategie zur Effizienzsteigerung von Oberflächenfiltern und zum Umgang mit dem Spannungsfeld Industrie 4.0 abzuleiten. Unabhängig vom Ausgangspunkt können unterschiedliche Facetten individuell weiterentwickelt werden, ohne dass der Bezug zum Gesamtkontext verloren geht.

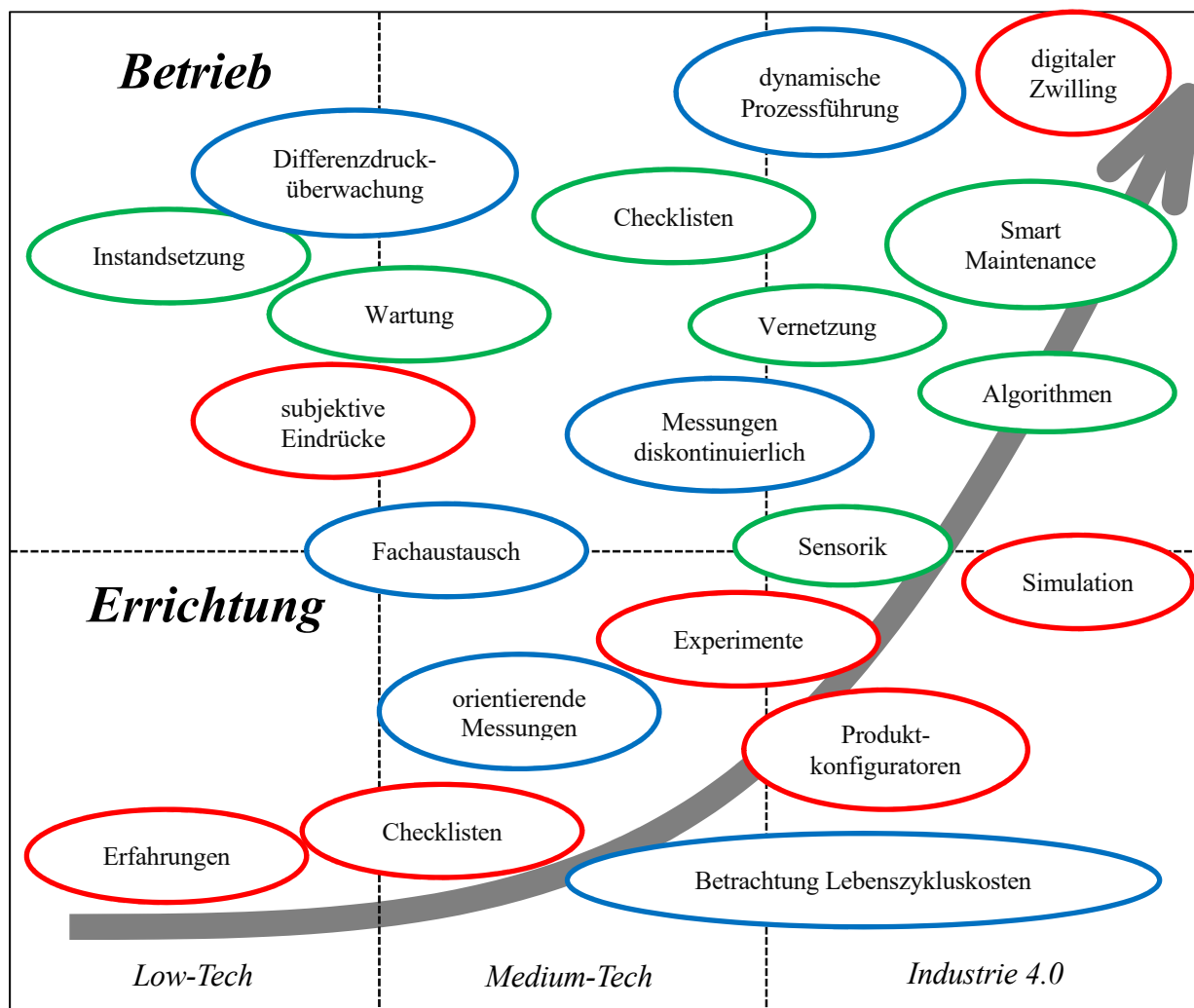


Bild 61: Roadmap Smart Oberflächenfilter

Die Errichtung von Oberflächenfiltern ausschließlich auf Grundlage von Erfahrungswerten wird als *Low-Tech* betrachtet. Die zunehmende Einbeziehung von Checklisten zur Aufnahme objektiver Werte, welche auch durch orientierende Messungen eruiert werden können, weist bereits *Medium-Tech*-Elemente auf. Als Voraussetzung hierfür dienen wirtschaftliche Betrachtungen und erste Absicherungen der Anlagenauslegung mit experimentellen Methoden. Eine Differenzierung der Differenzdrücke entsprechend Kapitel 4.4 findet anteilig statt. Elemente im Sinne von *Industrie 4.0* sind simulationsgetriebene Produktentwicklung, die Nutzung von Produktkonfiguratoren sowie die konsequente Stützung der Investitionsentscheidung auf Basis der Betrachtung von Lebenszykluskosten.

Der Betrieb von Oberflächenfiltern erfolgt in vielen Fällen noch auf dem Technologielevel *Low-Tech*. Allein der Differenzdruck wird überwacht und oft zur differenzdruckgesteuerten Filtermittelregenerierung genutzt. Erforderliche Instandsetzungs- und turnusmäßige Wartungsaktivitäten erhalten die Funktionalität. Subjektive Eindrücke zum Anlagenzustand (z. B. Ventilator) und zu den Betriebskosten (z. B. Filtermittel, Druckluftverbrauch, Instandhaltung) führen in wenigen Fällen zur Verbesserung von Oberflächenfiltern. Eine checklistenbasierte Überwachung der Anlagenzustände ggfs. mit Nutzung von Messgeräten in Anlehnung an Bild 57 stellt eine *Medium-Tech*-Umgebung dar, falls diese Daten regelmäßig erhoben und systematisch ausgewertet werden. Optimierte Wartungsintervalle und –inhalte im Ergebnis der Auswertung der Wartungshistorie sowie der Umgang mit Veränderungen vor- und nachgeschalteter Prozesse werden als standardisierte Instrumente eingeführt. Der Technologielevel Industrie 4.0 kann nur erreicht werden, wenn alle Aktivitäten automatisiert werden. Dies betrifft die sensorische Erfassung und Auswertung der Anlagenzustände hinsichtlich Funktionalität der Komponenten und Zustand des Prozesses. Spezifische Auswertealgorithmen erkennen kritische Situationen, reagieren automatisiert auf Prozessänderungen und leiten daraus Konsequenzen für übergeordnete Prozesse ab. Die Priorität des Smart Oberflächenfilters liegt auf minimalen Betriebskosten und Emissionen sowie auf maximaler Verfügbarkeit und Transparenz.

Jedes Unternehmen, unabhängig davon, ob Errichter oder Betreiber von Oberflächenfiltern, kann eine zukunftsichere Industrie 4.0-Strategie für Oberflächenfilter entwickeln und verfolgen. Die Unternehmensgröße ist dabei nicht entscheidend. Kleine und mittlere Unternehmen besitzen tendenziell flache Hierarchien, ein hohes Maß an Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, was den Unternehmen den Einstieg erleichtern kann. Eine Umsetzungsstrategie mit Verfolgung vielversprechender, vorerst kleinerer und damit überschaubarer Projekte stellt ein effizientes Mittel dar, um Zukunftsthemen voranzutreiben. Technologiepartnerschaften ermöglichen einen

Erfahrungsaustausch, um rasch Expertise aufzubauen. Den Mitarbeitern sollte dabei ein Gestaltungsspielraum gegeben und ein Mitbestimmungsrecht eingeräumt werden, um diesbezüglich im Arbeitsalltag zu sensibilisieren. Industrie 4.0 ist eine Notwendigkeit und sollte als solche wahrgenommen werden, bei der der Mensch unverändert im Mittelpunkt steht. Aktuelle Entwicklungen zur Digitalisierung (u. a. MES- / ERP-Systeme) und Nachhaltigkeit (u. a. Energie- und Umweltmanagementsysteme) erfordern standardisierte und integrierte Unternehmensabläufe und unterstützen damit auch die stringente Logik von Automatisierungsprozessen im Sinne von Industrie 4.0.

7 Fazit und Ausblick auf anstehende Herausforderungen

Zukunftssichere Oberflächenfilter müssen steigenden Anforderungen hinsichtlich reduzierter Emissionsgrenzwerte, Energieeffizienz und Digitalisierung gerecht werden. Der am Markt weit verbreitete Einsatz von Filtertechnik, die ausschließlich auf Grundlage von Erfahrungswerten ausgelegt wurde, wird diesen Ansprüchen in absehbarer Zeit nicht mehr gerecht. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es deshalb, einen Beitrag zur Steigerung der Effizienz von Oberflächenfiltern zu leisten.

Als wesentlichen Einflussparameter auf die Effizienz von Oberflächenfiltrationsprozessen wurden zirkulierende Staubanteile ausfindig gemacht. Die Erkenntnisse zu diesem Effekt wurden zusammengetragen und im Ergebnis eigener konzeptioneller und experimenteller Untersuchungen systematisch erweitert. Es wurde eine Methodik entwickelt, zirkulierende Staubanteile zu bilanzieren, auf dessen Grundlage sich Strategien zu deren Vermeidung objektiv beurteilen lassen. Das Verfahren lässt sich im Labor- und Technikumsmaßstab sowie anhand realer Oberflächenfilter anwenden.

Neben der Vermeidung zirkulierender Staubanteile zeichnen sich effiziente Oberflächenfilter durch geringe Staubemissionen und Betriebskosten aus. Als Voraussetzung hierfür sind die Konstruktion und der Prozess sorgfältig auszulegen und der Filter mit hochwertigen Komponenten zu errichten. Anhand der Nutzung eines Produktkonfigurators und mit Betrachtung der Lebenszykluskosten wird aufgezeigt, dass selbst hohe Investitionskosten über den Betrieb des Filters ökonomisch und ökologisch leicht zu rechtfertigen sind. Methodische Ansätze zur Unterstützung der Anlagenauslegung werden dazu gegenübergestellt. Die Bedeutung der systematischen Minimierung von Druckverlusten sowie dessen energieeffizienter Erzeugung wird hervorgehoben.

Unter Berücksichtigung der neuen Erkenntnisse zu zirkulierenden Staubanteilen sowie mit Anwendung der Lebenszykluskosten wird das Potenzial des Rotationentstaubers als neuartiger Typ Oberflächenfilter untersucht. Der Benchmark mit einem konventionellen Oberflächenfilter liefert dazu eine objektive Datengrundlage. Es zeigt sich, dass der Rotationentstauber unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht marktreif ist. Gegenüber einem Schlauchfilter wurden höhere Staubemissionen und Lebenszykluskosten ermittelt.

Die Notwendigkeit zur Digitalisierung und die sich daraus ergebenden Chancen und Risiken wurden auf Oberflächenfilter angewandt. Im Spannungsfeld Industrie 4.0 wird das Potenzial einer modernen Instandhaltung mit maximierter Verfügbarkeit und minimierten Betriebskosten aufgezeigt. Auch die Vernetzung von Oberflächenfiltern mit vor- und nachgeschalteten Prozessstufen eröffnet neue Anwendungsfelder im Sinne smarter Technologie. Eine Handlungsempfehlung zur Errichtung und zum Betrieb effizienter Oberflächenfilter wird gegeben.

Zur Umsetzung internationaler Verpflichtungen bezüglich der Reduzierung von Feinstaubemissionen bietet sich ein Anreizsystem in Anlehnung an den Handel mit Treibhausgasen an, wozu gesetzliche Regelungen existieren [104, 105, 106]. Durch Zuteilung von Emissionsberechtigungen, Überwachung und Berichterstattung wird ein transparenter Markt für große Emittenten von Treibhausgasen gefördert. Eine Reduzierung spezifischer Emissionen ist vorgegeben und wird zusätzlich durch einen kontrollierten Handel mit nicht benötigten Emissionsberechtigungen gefördert. Diese ökonomisch abbildbare Verringerung negativer ökologischer Auswirkungen in Form von Treibhausgasen kann auf Feinstaubemissionen übertragen werden. Alternativ dazu kann eine Emissionssteuer für Stäube eingeführt werden, die zunächst bei Immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftigen Anlagen Anwendung findet. Die behördlich vorgeschriebene Messung der Staubemissionen liefert dazu einen objektiven Messwert, der die Grundlage für den Steuerbescheid liefert. Freiwillig kontinuierlich überwachte Anlagen ermöglichen im Sinne dieser Arbeit eine schnelle Erkennung defekter Filterelemente sowie ein besseres Prozessverständnis und sollten aus diesen Gründen steuerlich begünstigt werden. Diese Steuer kann im Zuge der Betrachtung von Lebenszykluskosten verrechnet werden, womit umweltfreundlichen Technologien ein wirtschaftlicher Vorteil zugewiesen werden kann. Mit den eingenommenen Steuergeldern sollte ein bundesweites Programm zur Förderung effizienter Oberflächenfilter und damit des Immissionsschutzes aufgelegt werden. Wesentliche Elemente dieser Förderung beziehen sich auf den Einsatz effizienter Komponenten wie z. B. Ventilatoren, Druckluftventile und Filtermittel sowie die experimentelle und simulative Unterstützung der Anlagenauslegung.

Zur Effizienzsteigerung von Oberflächenfiltern bezüglich Reduzierung der Staubemissionen und Steigerung der Energieeffizienz ist der Stand der Technik fortzuschreiben und für die Errichtung und den Betrieb von Oberflächenfiltern konsequent anzuwenden. Weiterhin sind Anreize zu schaffen, um den Prozess der Effizienzsteigerung und Digitalisierung von Oberflächenfiltern zu beschleunigen. Alle Ziele könnten durch Erstellung eines BVT-Merkblattes „Oberflächenfilter“ umgesetzt werden. Die in dieser Form für verschiedene Branchen und Anwendungen zusammengefasste beste verfügbare Technik beinhaltet aktuell nur unzureichende Informatio-

nen zum Emissionsverhalten und zur Energieeffizienz von Oberflächenfiltern. Das BVT-Merkblatt „Energieeffizienz“ [107] trifft ebenfalls keine konkreten Aussagen zur Oberflächenfiltration. Zudem handelt es sich bei BVT-Merkblättern z. T. um sehr umfangreiche Dokumente, die damit für viele speziell kleinere Institutionen schlecht nutzbar sind. Bild 62 bildet dazu eine Empfehlung wesentlicher Themenkomplexe des zu konzipierenden BVT-Merkblatts ab, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit behandelt werden. Alternativ dazu wäre auf nationaler Ebene die Novellierung der VDI-Richtlinie 3677 Blatt 1 (Oberflächenfilter) möglich.

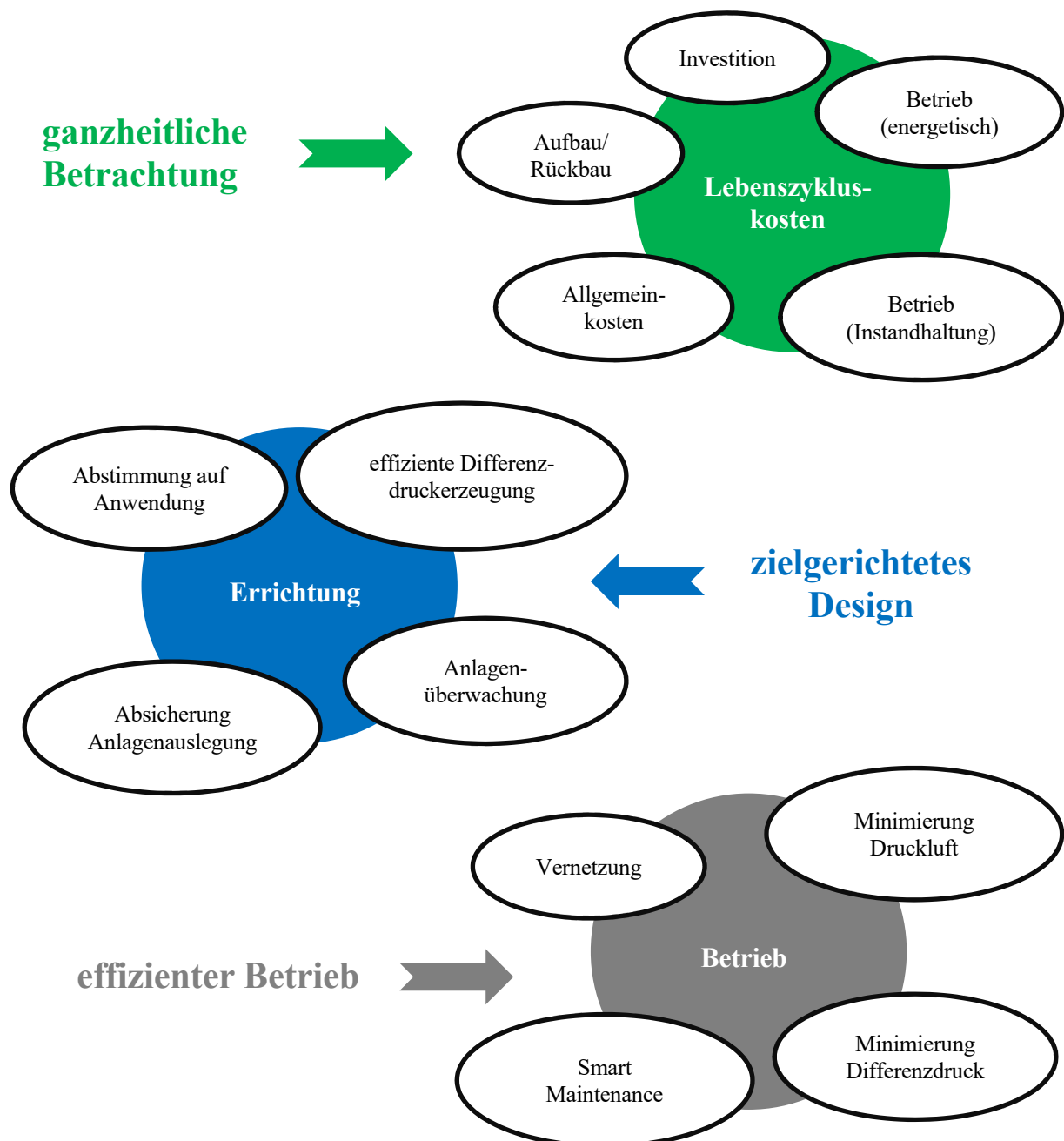


Bild 62: Konzept BVT-Merkblatt „Oberflächenfilter“

Ein smarter Filter vereinigt alle Elemente des Konzeptes der besten verfügbaren Technik zur Oberflächenfiltration entsprechend Bild 62. Dabei findet eine ganzheitliche Betrachtung der Oberflächenfiltration statt, bei der alle über den gesamten Lebenszyklus des Filters anfallenden Kosten betrachtet werden. Durch Berücksichtigung von Allgemeinkosten, die bisher die Gesellschaft zu tragen hatte, werden effiziente Oberflächenfilter gefördert, was einen nachhaltigen Immissionsschutz darstellt. Ein zielgerichtetes Design von Filteraufbau und –betrieb ermöglicht unter Nutzung moderner Methoden zur Absicherung der Anlagenauslegung die Errichtung hochwertiger und damit konkurrenzfähiger Oberflächenfilter. Mit der Integration von Komponenten zur Überwachung der Betriebszustände wird ein effizienter Betrieb möglich, der sich durch geringe Energie- und Instandhaltungskosten sowie minimierte Staubemissionen auszeichnet. Die Vernetzung mit vor- und nachgeschalteten Prozessstufen schafft maximale Anlagen- und Prozesstransparenz.

Literaturverzeichnis

- [1] UMWELTBUNDESAMT. *Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen* [online]. *Emissionsentwicklung 1990 bis 2016 (Stand 02/2018)*. Available from: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen>.
- [2] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *Air quality in Europe. 2017 report*. Luxembourg, 2017.
- [3] EUROPÄISCHE KOMMISSION. *Allgemeines Umweltaktionsprogramm der Union für die Zeit bis 2020. Gut leben innerhalb der Belastbarkeitsgrenzen unseres Planeten*: Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, 2014. 978-92-79-34723-8.
- [4] EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION. *Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa*, 21 May. 2008.
- [5] EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION. *Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verhinderung der Umweltverschmutzung)*, 24 Nov. 2010.
- [6] RIPPERGER, Siegfried. Technisches Recht zur Anlagentechnik. Teil 1: Europäische Regelungen. *F & S Filtrieren und Separieren*. 2016, **30**(4), 218-223.
- [7] DEUTSCHER BUNDESTAG. *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. BImSchG*.
- [8] DEUTSCHER BUNDESTAG. *Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen)*. 1. BImSchV.
- [9] DEUTSCHER BUNDESTAG. *Dreizehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Großfeuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen)*. 13. BImSchV.
- [10] DEUTSCHER BUNDESTAG. *Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen)*. 17. BImSchV.
- [11] DEUTSCHER BUNDESTAG. *Fünfundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Begrenzung von Emissionen aus der Titandioxid-Industrie)*. 25. BImSchV.

- [12] DEUTSCHER BUNDESTAG. *Dreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen)*. 30. BImSchV.
- [13] DEUTSCHER BUNDESTAG. *Neunte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über das Genehmigungsverfahren)*. 9. BImSchV.
- [14] DEUTSCHER BUNDESTAG. *Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft)*. TA Luft.
- [15] DEUTSCHER BUNDESTAG. *Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen)*. 4. BImSchV.
- [16] RIPPERGER, Siegfried. Technisches Recht zur Anlagentechnik. Teil 2: Deutsche Rechtsvorschriften. *F & S Filtrieren und Separieren*. 2016, **30**(5), 306-308.
- [17] KLIMASCHUTZPLAN 2015. *Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. Berlin, November 2016.
- [18] Energieverbrauch steigt, Emissionen auch. *Energie Informationsdienst GmbH (EID)*. 2017, (47), 1-2.
- [19] LÖFFLER, Friedrich, Hans DIETRICH, and Werner FLATT. *Staubabscheiden mit Schlauchfiltern und Taschenfiltern*. Braunschweig: Vieweg, 1984. 3-528-08566-5.
- [20] LÖFFLER, Friedrich. *Staubabscheiden*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1988. 3-13-712201-5.
- [21] KASPER, Gerhard. *Filtertechnik für Gase (Fortbildungskurs am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik)*. Karlsruhe, 2012.
- [22] Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL. 3677, Blatt 2, *Filternde Abscheider - Tiefenfilter aus Fasern*: Beuth-Verlag.
- [23] HILLER, R. *Der Einfluss von Partikelstoß und Partikelhaftung auf die Abscheidung in Faserfiltern*. Dissertation. Karlsruhe, 1980.
- [24] LEE, K. W., and B. Y. H. LIU. Theoretical Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters. *Aerosol Science and Technology*. 1982, **1**, 147-161.
- [25] FRIEDLANDER, Sheldon K. *Smoke, Dust, and Haze. Fundamentals of Aerosol Dynamics*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2000. 0-19-512999-7.
- [26] SAGER, Christoph. *Der Partikeltransport in turbulent durchströmten Rohrleitungen und seine besondere Bedeutung für die Partikelmessstechnik*. Dissertation. Duisburg, 2007.

- [27] FRITZ, Wolfgang and Heinz KERN. *Reinigung von Abgasen*. 3rd ed. Würzburg: Vogel, 1992. 3-8023-1454-9.
- [28] Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL. 3677, Blatt 1, *Filternde Abscheider - Oberflächenfilter*: Beuth-Verlag.
- [29] BRAUER, Heinz. *Additiver Umweltschutz. Behandlung von Abluft und Abgasen*. Berlin: Springer, 1996. Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik. 3. 3-540-58060-3.
- [30] SCHILLER, Sascha and Hans-Joachim SCHMID. *Filtration of Ultrafine Dust Emitted by Biomass Combustion*. Karlsruhe, 16 Jun. 2014. Aerosol Technology 2014 - Posterpräsentation.
- [31] SCHOLLMEIER, Stefan. *Beladungskinetik von Faserfiltern - Beladungskinetik einzelner Filterfasern*. Dissertation. Karlsruhe, 2008.
- [32] BACH, Bastian. *Fehlstellenbedingte Partikelpenetration von Oberflächenfiltern zur Staubabscheidung*. Aachen: Shaker, 2007. Wuppertaler Reihe zur Umweltsicherheit. 978-3-8322-6063-7.
- [33] SCHMIDT, Eberhard. *Elektrische Beeinflussung der Partikelabscheidung in Oberflächenfiltern*. Dissertation. Karlsruhe, 1991.
- [34] KATZER, Matthias, and Eberhard SCHMIDT. Untersuchungen zum Wachstum feinsten fester Partikel in der Gasphase bei elektrischer Beeinflussung. *Chemie Ingenieur Technik*. 1998, **70**(1-2), 108-111.
- [35] MEYER, Jörg. *Elektrische Koronaentladung submikroner Partikeln und deren Einfluss auf die Oberflächenfiltration*. Aachen: Shaker Verlag, 2002. 3-8322-1005-9.
- [36] IMSE, W. Messung der Fließfähigkeit von Zement. *Zement-Kalk-Gips*. 1972, **25**, 147-149.
- [37] HÖHNE, D. and O. SCHÜNEMANN. *Der Einfluss der Mahlhilfsmittel auf auf das Verhalten von Zement*, 1976. Freiburger Forschungshefte. 553.
- [38] FISCHER, W. Fließverhalten von Zement. *Zement-Kalk-Gips*. 1967, **20**(4), 138-139.
- [39] FÜRL, Christian, and Thomas HOFFMANN. Die Dichte berücksichtigen. Bewertung der Fließeigenschaften von Schüttgütern. *AT Mineral Processing*. 2015, **56**(5), 45-65.
- [40] LONDERSHAUSEN, Tim, Eberhard SCHMIDT, Sören SANDER, and Udo FRITSCHING. *Characterization of Dustiness. Influence of low pressure*. Köln, 24 Feb. 2015. Filtech Conference.
- [41] LONDERSHAUSEN, Tim, Eberhard SCHMIDT, Sören SANDER, and Udo FRITSCHING. *Characterization of Dustiness. Influence of deposit thickness*. Nürnberg, 19 Apr. 2016. Partec Conference.

- [42] SCHMIDT, Eberhard. Release of Nanoparticles when Handling Fumed Silica. *Chem. Eng. Technol.* 2015, **38**(11), 2096-2098.
- [43] LONDERSHAUSEN, Tim, Eberhard SCHMIDT, M. HENNIG, and U. TEIPEL. *Simulation to Quantify the Dustiness of Powders*. Köln, 11 Oct. 2016. Filtech Conference.
- [44] PETER SCHULZ. *Filtermedien für die Entstaubungstechnik*. Karlsruhe, 9 May. 2012. Filtertechnik für Gase - Fortbildungskurs 2012.
- [45] KASPER, Gerhard, Jörg MEYER, and Oliver KURTZ. *Verringerung des Energieverbrauchs und der Feinstaubemission von industriellen Schlauchfilteranlagen* [online]. Abschlussbericht zum Förderprogramm "EFRE Umwelttechnik" des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Available from: <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/113050/?COMMAND=DisplayBericht&FIS=203&OBJECT=113050&MODE=METADATA>.
- [46] VDI Verein deutscher Ingenieure. VDI 2066 Blatt 1, *Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung*. Berlin: Beuth-Verlag.
- [47] GÖRNER, Klaus and Kurt HÜBNER. *Gasreinigung und Luftreinhaltung*. Berlin: Springer, 2002. 3-540-42006-1.
- [48] SCHMIDT, Eberhard, and Xiangyang XU. Wiedieranlagerung von Staub bei der Regenerierung von Oberflächenfiltern. *Chemie Ingenieur Technik*. 2001, **73**(12), 1597-1599.
- [49] LEUBNER, Holger, and Ulrich RIEBEL. Druckstoßabreinigung textiler und starrer Filtermedien. Abreinigungsrelevante Parameter. *Chemie Ingenieur Technik*. 2003, **75**(5), 504-514.
- [50] GÄNG, Peter. *Prüfung und Auswahl von Filtermedien für Abreinigungsfilter*. Seminar "Gasreinigung mit Oberflächenfiltern". Düsseldorf, September 2005.
- [51] ZHANG, Quian, and Eberhard SCHMIDT. Methodisches Vorgehen bei experimentellen Untersuchungen zur Oberflächenfiltration mit flexiblen Filtermedien an einer genormten Filterprüfapparatur. *Chemie Ingenieur Technik*. 2012, **84**(0), 1-8.
- [52] MÖLLER, Martin. *Umweltfreundliche Beschaffung. Einführung in die Berechnung von Lebenszykluskosten und deren Nutzung im Beschaffungsprozess*. Dessau-Roßlau, Oktober 2012.
- [53] UMWELTBUNDESAMT. *Ökologisches Design als Qualitätskriterium in Unternehmen stärken*. Dessau-Roßlau, Mai 2017.
- [54] VDI Verein deutscher Ingenieure. 2264, *Inbetriebnahme, Betrieb und Instandhaltung von Abscheideanlagen zur Abtrennung gasförmiger und partikelförmiger Stoffe aus Gasströmen*.

- [55] VDI Verein deutscher Ingenieure. 2260, *Technische Gewährleistung für Gasreinigungsanlagen Partikel- und gasförmige Stoffe*.
- [56] KLEIN, G. M., T. NEUHAUS, P. BAI, Th. SCHROOTEN, and T. DANIEL. Verminderung der durch die Partikelablagerung verursachte Druckverlust in industriellen Schlauchfiltern. *F&S Filtrieren und Separieren*. 2009, **23**(3), 134.
- [57] Verfahren zur Abreinigung der Gewebefilterelemente in Kammerfilter-Anlagen. Inventor: Alois Scheuch Gesellschaft m.b.H. Appl: 15 February 1994. AT 400 228 B.
- [58] DELBAG-LUFTFILTER GMBH. Staubsammelbehälter und Verfahren zur Verhinderung des Wiedereintretens von Staub in den Ansaugluftstrom bei der Abreinigung zylindrischer Filterelemente. Inventor: Werner BRINKHOFF, and Rainer EWERT. Appl: 16 January 1985. DE 3501 618 A1.
- [59] FILTRATION GROUP GMBH. *Staubfilterelement* [online]. *Vorteil konischer Staubfilterelemente*. Available from: https://www.mahle.com/media/global/products-&-services/industrial-applications/filtration/data-sheets/data-sheets-air-filtration-filters/vorteile_konischer_elemente_de.pdf.
- [60] DONALDSON COMPANY, Inc. *Downflo Evolution Dust Collectors* [online] [viewed 21 November 2016]. Available from: <http://www2.donaldson.com/torit/en-us/product%20literature/productbrochures/torit-dfe-brochure.pdf>.
- [61] DEGUSSA AKTIENGESELLSCHAFT. Verfahren zur Abreinigung von Filtertüchern mittels Druckgas-Impuls bei der Feststoffabscheidung aus Gasen. Inventor: Hans-Friedrich BACH, Henning BODE, and Andreas KLUGE. Appl: 29 April 1981. EP 0 043 417 A2.
- [62] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN ISO 11057, *Emissionen aus stationären Quellen - Prüfverfahren für die Charakterisierung des Filtrationsverhaltens abreinigbarer Filtermedien*. Berlin: Beuth-Verlag.
- [63] PALAS GMBH. *Bedienungsanleitung BEG 1000*. Karlsruhe, Juni 2008.
- [64] SICK AG. *Betriebsanleitung Dusthunter T Staubmesssystem. Beschreibung, Installation, Betrieb*. Version 2.2. Waldkirch, April 2014.
- [65] HELMUT HUND GMBH. *Bedienungsanleitung stationäres Feinstaubmessgerät TM-F*. Version 2.1, November 2013.
- [66] Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL. 3867, Blatt 4, *Messung von Partikeln in der Außenluft - Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und Anzahlgrößenverteilung von Aerosolen - Optisches Aerosolspektrometer*: Beuth-Verlag.
- [67] HINDS, William C. *Aerosol Technology. Properties, Behavior, and measurement of airborne particles*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1999. 0-471-19410-7.

- [68] TOPAS GMBH. *Bedienungsanleitung Laser Aerosol Particle Size Spectrometer*, Dezember 2012.
- [69] KLEIN, G. M., Th. SCHROOTEN, T. NEUHAUS, and R. KRÄBS. *Energieeffiziente Jet-Pulse-Entstaubungsanlagen* [online]. 1 December 2018, 12:00. Available from: https://www.intensiv-fil-ter.com/fileadmin/user_upload/presse/files/20090507_Energieeffiziente_Jet_Pulse_Entstaubungsanlagen_Gefahrstoffe_RdL_D.pdf.
- [70] KELLER LUFTECHNIK GMBH & CO. KG. *Strömungssimulation als Dienstleistungsangebot*, Juli 2008.
- [71] DONGMO, Esther. *Optimierung eines Absaugsystems (Rohgas, Filtermedium und Reingas) für abrasiven Staub mit Hilfe numerischer Strömungssimulation*. Bremen, 24 Jun. 2015. ANSYS Conference & 33. CADFEM User's Meeting.
- [72] SCHEUCH GMBH. *EMC Energy Minimizing Concept* [online]. *Schlauchfilter-Technologie* [viewed 20 November 2016]. Available from: http://www.scheuch.com/uploads/tx_ecxbaseext/News/EMC_deutsch.pdf.
- [73] BACH, Bastian, Stefan ZACHER, Eberhard SCHMIDT, and Wolfgang TIMM. The Physics of Dust Filter Caking. *Fluent News*. 2006, 10-11.
- [74] HELLMANN, A., K. SCHMIDT, and S. RIPPBERGER. *Comparison of measurement and simulation of particle deposition at charged microfibers*. Karlsruhe, 16 Jun. 2014. Aerosol Technology 2014.
- [75] KIRSCH, Ralf. *Filter Element Simulation Toolbox* [online]. 29 January 2018, 12:00. Available from: https://www.itwm.fraunhofer.de/content/dam/itwm/de/documents/SMS_Infomaterial/sms_flyer_FiltEST_EN.pdf.
- [76] RIPPERGER, Siegfried, and Kilian SCHMIDT. Entwicklung von Geweben als Filtermedien unter Berücksichtigung der numerischen Strömungssimulation. *F & S Filtrieren und Separieren*. 2015, **29**(6), 378-381.
- [77] WAGNER, Walter. *Rohrleitungstechnik*. 8th ed. Würzburg: Vogel, 2000. 3-8023-1828-5.
- [78] STATISTA GMBH. *Industriestrompreise in Deutschland* [online]. Available from: <https://de.statista.com>.
- [79] EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION. *Richtlinie 2009/125/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte*, 21 Oct. 2009.
- [80] EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION. *Verordnung 640/2009 zur Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren*, 22 Jul. 2009.

- [81] DEUTSCHER BUNDESTAG. *Gesetz über die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte*. EVPG, 27 Feb. 2008.
- [82] PETZOLD, Ole. Standzeit rauf. Feinstaubfiltration bei der Produktion von Tindioxid Weißpigmenten. *Chemie Technik*. 2007, **36**(1), 44-47.
- [83] Coanda-Injektor und Druckgasleitung zum Anschluß eines solchen. Inventor: Intensiv-Filter GmbH & Co KG. Appl: 28 October 1998. Deutschland. DE29823965U1.
- [84] Filtersystem mit einem Rotationsfilter. Inventor: Dirk BARNSTEDT. Appl: 17 October 2013. WO 2015/055157 A1.
- [85] FELUTEX AG. *Trommelfilter* [online] [viewed 24 November 2016]. Available from: <http://www.felutex.ch/trommelfilter.html>.
- [86] LTG AG. *Trommelfilter* [online] [viewed 24 November 2016]. Available from: <https://www.ltg.de/app/uploads/2015/09/Trommelfilter-TFB-TFC.pdf>.
- [87] TRM FILTER. *Rotatronic* [online] [viewed 24 November 2016]. Available from: <http://www.rotatronic.eu/en/rotatronic>.
- [88] MAHLE INDUSTRIEFILTRATION GMBH. *Automatic-Kantenspaltfilter* [online] [viewed 24 November 2016]. Available from: [https://www2.mahle.com/c1256f7900537a47/vwcontentbykey/w26ufbsr270stulen/\\$file/af73g_af93g_edelstahl_de.pdf](https://www2.mahle.com/c1256f7900537a47/vwcontentbykey/w26ufbsr270stulen/$file/af73g_af93g_edelstahl_de.pdf).
- [89] LENZING TECHNIK GMBH. *Automatischer Rückspülfilter* [online] [viewed 24 November 2016]. Available from: http://www.lenzing-tech-nik.com/fileadmin/template/pdf/konzern/bereichsfolder/LTS_012016/1_LT_ViscoFil_6seiter_de.pdf.
- [90] Rotationsfilter. Inventor: Karl Wilh. Ludwig QUASCHNER. Appl: 15 March 1986. DE 3608741 A1.
- [91] Filter mit einer in einem vertikalachsigen Gehäuse konzentrisch rotierenden Filtertrommel. Inventor: Erin MEIER. Appl: 13 February 1963. CH 388 742.
- [92] Gas-Filter. Inventor: Jakob SCHERRER. Appl: 5 April 1941. CH 218022.
- [93] Trommelfilter. Inventor: Peter WETTER. Appl: 10 January 1989. CH 677453 A5.
- [94] INTER-WOOD-MASCHINEN GMBH & CO KG. Kontinuierlich selbstreinigender Filter für gasförmige oder flüssige Medien. Inventor: Peter VOELSKOW. Appl: 17 November 1971. DT 2156957.
- [95] SIEBERT, Gunnar and Stefan KEMPF. *Benchmarking. Leitfaden für die Praxis*. 3rd ed. München: Carl Hanser Verlag, 2008. 978-3-446-41569-0.
- [96] STATISTISCHES BUNDESAMT. *Verbraucherpreisindex* [online] [viewed 3 February 2018]. Available from: <https://www.destatis.de>.

- [97] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (BMBF), REFERAT GRUNDSATZFRAGEN DER INNOVATIONSPOLITIK. *Die neue Hightech-Strategie* [online]. *Innovationen für Deutschland*. Available from: <https://www.hightech-strategie.de/de/Publikationen-714.php>.
- [98] ACATECH - DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN, ed. *Smart Maintenance für Smart Factories. Mit intelligenter Instandhaltung die Industrie 4.0 vorantreiben*. München: Herbert Utz Verlag, 2015. 978-3-8316-4493-3.
- [99] SCHLATT, Anja. *Predictive Maintenance. Maschinenfehler und -ausfälle im Vorfeld erkennen*. München: Genios Verlag, 2014. Genios Wirtschaftswissen. 10. 978-3-7379-5828-8.
- [100] SIEMENS AG, POWER GENERATION, INSTRUMENTATION & CONTROLS. *Vibrocam 5000NT* [online]. *Das diagnostische Überwachungssystem zur Optimierung der Verfügbarkeit von Turbomaschinen*. Available from: http://www.ingenieurbuero-olsen.com/docs/vibrocam5000_d.pdf.
- [101] NEUMANN, Hartmut. *Anlagenbewertung mittels Schwingungsmessung. Normative Vorgaben und Analysen von Schwingungsspektren*. Dresden, 24 Sep. 2009. Forum Anlagenoptimierung.
- [102] SÜDMERSEN, Ulrich. *Schwingungsanalyse zur Schadensbeurteilung und Prozessoptimierung*. St. Gallen, 28 Apr. 2008. Zerstörungsfreie Materialprüfung. 978-3-940283-09-2.
- [103] KASPERSKY LAB. *The State of Industrial Cybersecurity 2017* [online]. Available from: <https://go.kaspersky.com/rs/802-IJN-240/images/ICS%20WHITE%20PAPER.pdf>.
- [104] DEUTSCHER BUNDESTAG. *Gesetz über den Handel mit Berechtigungen zur Emission von Treibhausgasen. TEHG*, 21 Jul. 2011.
- [105] DEUTSCHER BUNDESTAG. *Verordnung zur Durchführung des Treibhausgas-Emissionshandelsgesetzes in der Handelsperiode 2013 bis 2020. EHV*, 20 Aug. 2013.
- [106] DEUTSCHER BUNDESTAG. *Verordnung über die Zuteilung von Treibhausgas-Emissionsberechtigungen in der Handelsperiode 2013 - 2020. ZuV*, 26 Sep. 2011.
- [107] EUROPÄISCHE KOMMISSION. *Best Available Techniques for Energy Efficiency* [online]. Available from: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/besteverfuegbare-techniken/sevilla-prozess/bvt-merkblaetter-durchfuehrungsbeschluesse>.

Anhänge

Anhang 1: Messwerte Partikelgrößenverteilungen

x [μm]	Q ₃ (x) [%]				
	Calcit MX20	Calcit MS12	Apyral 16	Flugasche	Pural SB
4,5	63,67	44,84	17,65	29,02	6,46
5,5	74,87	53,34	21,60	34,95	8,04
6,5	83,20	60,17	25,25	40,06	9,59
7,5	89,22	65,63	28,67	44,49	11,13
9,0	95,16	71,92	33,42	50,15	13,42
11,0	99,08	77,69	39,22	56,27	16,45
13,0	100,00	81,34	44,52	61,18	19,47
15,5	100,00	84,05	50,60	66,10	23,27
18,5	100,00	85,90	57,23	70,84	27,85
21,5	100,00	87,19	63,25	74,77	32,45
25,0	100,00	88,66	69,56	78,69	37,79
30,0	100,00	90,96	77,26	83,39	45,20
37,5	100,00	94,25	86,03	88,66	55,50
45,0	100,00	96,71	91,83	92,13	64,51
52,5	100,00	98,33	95,42	94,45	72,08
62,5	100,00	99,55	98,13	96,64	80,12
75,0	100,00	100,00	99,63	98,44	87,44
90,0	100,00	100,00	100,00	99,54	93,12
105,0	100,00	100,00	100,00	99,92	96,43
125,0	100,00	100,00	100,00	100,00	98,69
150,0	100,00	100,00	100,00	100,00	99,78
180,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
215,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
255,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
305,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
365,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
435,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
515,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
615,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
735,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
875,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Anhang 2a: Datenblatt Calcit MX 20

	Schön+Hippelein Calcit
Technisches Merkblatt	C A L C I T MX 20

Charakteristik: **CALCIT MX 20** ist ein feinkristallines, natürliches Calciumcarbonat mit rhomboedrischer Kristallstruktur, das wir nach modernsten Trockenmahlverfahren und Sichtprozessen herstellen. Den weißen Rohstein, der sich durch sehr hohe chemische Reinheit auszeichnet, gewinnen wir im eigenen Vorkommen aus der Malm- Epsilon-Schichtung des oberen Weißjura.

Chemische Analyse:	CaCO ₃	99,5	%
	MgCO ₃	0,3	%
	Fe ₂ O ₃	0,05	%
	HCl-Unlösliches	0,3	%

Physik. Kennwerte:	Feinheit	
	• Korngrößenverteilung	0 - 15 µm
	(Laser Granulometer CILAS 920)	
	• Mittlerer Teilchendurchmesser (D50%)	2,5 µm
	(Laser Granulometer CILAS 920)	
	• Siebrückstand 45 µm (ISO 787/7)	≤ 0,10 %
	Feuchtigkeit ab Werk (ISO787/2)	< 0,2 %
	pH-Wert (ISO787/9)	9
	Farbmaßzahlen CIE-L*a*b	
	(DIN 5033 Teil 3 LUCI 100, Dr. Lange, d/8 Normlichtart D 65, Normbeobachter 10)	
	L* (Helligkeitswert)	92
	a* (Rot-Grün-Buntheit)	0,4
	b* (Gelb-Blau-Buntheit)	6
	Helligkeit (Ry, C/2, DIN 53163)	88

Angaben zum Lieferanten:

Angaben zum Hersteller:



sh minerals GmbH
Im Waibertal
Co. KG
D – 89520 Heidenheim
 Tel: +49 (0) 7328 9615 50
 Fax: +49 (0) 7328 9615 60

Calcitwerk
Schön + Hippelein GmbH +
Im Waibertal
D - 89520 Heidenheim

DIN EN ISO 9001 zertifiziert

DIN EN ISO 9001 zertifiziert

Ausgabe
06/2009

Die in diesem techn. Merkblatt angegebenen Werte basieren auf Messungen, die im Rahmen unserer Qualitätsüberwachung laufend durchgeführt werden. Eine Rechtsverbindlichkeit kann hieraus jedoch nicht abgeleitet werden. Durch dieses techn. Merkblatt werden alle vorhergehenden Ausgaben ungültig.

Anhang 2b: Datenblatt Calcit MS 12

	Schön+Hippelein Calcit
Technisches Merkblatt	C A L C I T MS 12

Charakteristik: **CALCIT MS 12** ist ein feinkristallines, natürliches Calciumcarbonat mit rhomboedrischer Kristallstruktur, das wir nach modernsten Trockenmahlverfahren und Sichtprozessen herstellen. Den weißen Rohstein, der sich durch sehr hohe chemische Reinheit auszeichnet, gewinnen wir im eigenen Vorkommen aus der Malm- Epsilon-Schichtung des oberen Weißjura.

Chemische Analyse:	CaCO ₃	99,2	%
	MgCO ₃	0,3	%
	Fe ₂ O ₃	0,07	%
	HCl-Unlösliches	0,3	%

Physik. Kennwerte:	Feinheit		
	• Korngrößenverteilung	0 - 70	µm
	(Laser Granulometer CILAS 920)		
	• Mittlerer Teilchendurchmesser (D50%)	5,5	µm
	(Laser Granulometer CILAS 920)		
	• Siebrückstand 45 µm (ISO 787/7)	≤ 0,10	%
	Feuchtigkeit ab Werk (ISO 787/2)	< 0,2	%
	pH-Wert (ISO 787/9)	9	
	Farbmaßzahlen CIE-L*a*b		
	(DIN 5033 Teil 3 LUCI 100, Dr. Lange, d/8 Normlichtart D 65, Normbeobachter 10)		
	L* (Helligkeitswert)	91	
	a* (Rot-Grün-Buntheit)	0,6	
	b* (Gelb-Blau-Buntheit)	7	
	Helligkeit (Ry, C/2, DIN 53163)	87	

Angaben zum Lieferanten:

Angaben zum Hersteller:



sh minerals GmbH
Im Waibertal
Co. KG
D – 89520 Heidenheim
 Tel: +49 (0) 7328 9615 50
 Fax: +49 (0) 7328 9615 60

Calcitwerk
Schön + Hippelein GmbH +
Im Waibertal
D - 89520 Heidenheim

DIN EN ISO 9001 zertifiziert

DIN EN ISO 9001 zertifiziert

Ausgabe
06/2009

Die in diesem techn. Merkblatt angegebenen Werte basieren auf Messungen, die im Rahmen unserer Qualitätsüberwachung laufend durchgeführt werden. Eine Rechtsverbindlichkeit kann hieraus jedoch nicht abgeleitet werden. Durch dieses techn. Merkblatt werden alle vorhergehenden Ausgaben ungültig.

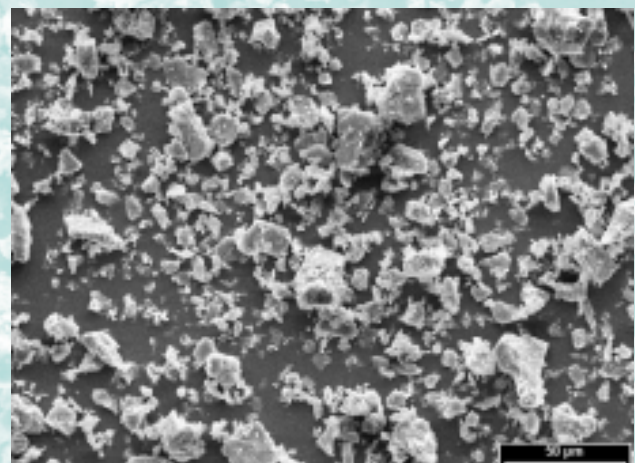
Anhang 2c: Datenblatt Apyril 16

APYRAL[®]**Nabaltec****Produkt-/Product-Information****APYRAL 16, APYRAL 24, APYRAL 32****Mineralische Flammschutzmittel für***Mineral flame retardants for*

- **Bauindustrie / Construction industry**
- **Fahrzeugbau / Public transport**
- **Elektro-/Elektronikindustrie / Electronic industry**

APYRAL[®]

Durchschnittsanalyse / Typical analysis		APYRAL 16	APYRAL 24	APYRAL 32
Al (OH) ₃ - Gehalt / -Content	[%]	99.7	99.7	99.7
Feuchte / Moisture	[%]	0.1	0.15	0.15
Glühverlust / Loss on ignition	[%]	34.6	34.6	34.6
Teilchengröße / Particle size				
(Laserbeugung) / (Laser diffraction)	D ₁₀ [µm]	1.5	1.3	1.2
	D ₅₀ [µm]	12	8	6
	D ₉₀ [µm]	40	20	16
Siebrückstand / Sieve analysis				
(> 45 µm)	[%]	3	0.1	0.01
Spezifische Oberfläche / Specific surface area				
(BET)	[m ² /g]	1.8	2.5	3.0
Schüttdichte / Bulk density				
	[kg/m ³]	750	650	640
Ölaufnahme / Oil absorption				
	[ml/100g]	17	19	21
Weißgrad / Whiteness				
(Elrepho 457 nm)	[%]	93	94	95
Spezifische Leitfähigkeit / Specific conductivity				
	[µS/cm]	50	60	60
Brechungsindex / Refractive index				
		1.58	1.58	1.58
Härteindex (Mohs) / Mohs hardness				
		2.5 - 3.5	2.5 - 3.5	2.5 - 3.5
Dichte / Density				
	[g/cm ³]	2.4	2.4	2.4

Produktvorteile / Product properties**Breite Kornverteilung***Broad grain size distribution***Niedrige Viskosität***Low viscosity***Hohe Oberflächengüte***High surface quality***Gute Packungsdichte***Good packing density*

Anhang 2d: Datenblatt Pural SB



Brunsbüttel, 19.02.2016

ANALYSENZERTIFIKAT

**** ABNAHMEPRÜFZEUGNIS DIN 50049-3.1 -- EN 10204-3.1 ****

Produkt: PURAL SB
Versandanzeige für: 10 kg
Lotnummer: 233144
Versandart: UPS
Bestell-/Freigabennr.: per Email
Lieferschein-Nr: 1964743 vom 18.02.2016 (Hochschule Nordhausen)

Tests

Ergebnisse

Spezifische Oberfläche (3h/550°C) [m²/g]	254
Feststoffgehalt [%]	76,0
Schüttdichte [g/ml]	0,73
Kornverteilung: < 25 µm [%]	24,3
Kornverteilung: < 45 µm [%]	48,6
Kornverteilung: < 90 µm [%]	90,7

Sasol Germany GmbH
Fritz-Staiger-Str. 15
25541 Brunsbüttel
Tel: 04852/392-0 Fax: 04852/3285

Mit freundlichen Grüßen
Abnahmebeauftragter
Michael Claußen

Dieses Zertifikat wurde maschinell erstellt und hat ohne Unterschrift Gültigkeit.

Die Übersendung dieses Analysenzertifikates erfolgt lediglich zur Information und stellt keine Zusicherung von Eigenschaften dar. Die Übersendung entbindet den Empfänger nicht von der Durchführung einer ordnungsgemäßen Wareneingangsprüfung. Dieses Analysenzertifikat begründet keine Ansprüche Dritter, an die es weitergereicht wird. Im Übrigen gelten unsere Allgemeinen Geschäftsbedingungen in der jeweils aktuellen Fassung.

Anhang 3: Versuchsanleitung zur Bestimmung zirkulierender Staubanteile an Filterprüfständen der Hochschule Nordhausen

Vorbereitung

- Einschalten des Filterprüfstands
- Einspannung des gewünschten Filtermittels in den Filterprüfstand (bevorzugt konditioniert in Anlehnung an [51])
- Einstellung der gewünschten Intensität für die Filtermittelregenerierung (elektronische Ventilöffnungszeit t_V , Abreinigungsdruck p_{Reg})
- Einstellung des Bürstendispergierers (Bandgeschwindigkeit v_{FB} , Bypasseinstellung) und Einfüllen des zu untersuchenden Staubs
- Voreinstellung der gewünschten Volumenströme zur Absaugung auf der Reingasseite (\dot{V}_{rein}) und Rohgasseite (\dot{V}_{roh})

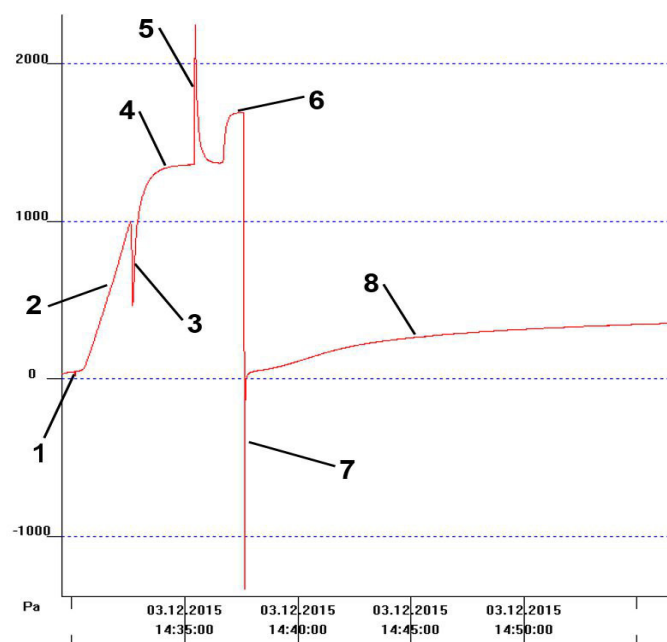
Versuchsdurchführung

- Einschaltung Rohgasvolumenstrom und warten, bis sich dieser auf den voreingestellten Wert eingeregelt hat
- Auslösen eines Druckluftstoßes (off-line), um im Rohgasraum evt. befindlichen Staub abzusaugen (Absaugdauer t_{Abs} entsprechend Formel (40) aus Volumen des Filterprüfstands V_{FPS} und \dot{V}_{roh} bestimmen)

$$t_{Abs} = 2 \cdot \frac{V_{FPS}}{\dot{V}_{roh}} \quad (40)$$

- bei Mehrfilteranordnung vorher räumliche Trennung der Filterelemente
- Abschaltung Rohgasvolumenstrom
- Einschaltung Reingasvolumenstrom und Ablesen des Restdruckverlustes des konditionierten Filtermittels (Punkt 1 Bild, $\Delta p_{R,0}$) nach Stabilisierung der Messwerte (Veränderung Differenzdruck $\leq 1 \text{ Pa}/40 \text{ s}$)

- Einschalten der Druckluftversorgung des Staubdosierers und Einstellung des Dispergierdrucks p_D
- Einschalten des Förderbandes und Dosierung von Staub bis zum Erreichen des gewünschten Endruckverlustes (Punkt 2 Bild, Δp_E)
- Abschaltung des Dosierers (bewirkt entsprechend Punkt 3 Bild eine kurzzeitige Druckschwankung im System) - auf Basis experimenteller Erfahrungswerte muss der Dosierer vor Erreichen des Enddruckverlusts vorzeitig abgeschaltet werden, um im Rohgasraum noch befindlichen Staub zum Erreichen des Enddruckverlusts zu nutzen (Punkt 4 Bild)
- Abschaltung Rohgasvolumenstrom (bewirkt entsprechend Punkt 5 Bild eine kurzzeitige Druckschwankung im System)
- ggfs. Variation des Reingasvolumenstroms zur Anpassung der Filterflächenbelastung (nur bei variabler Anfiltration) und Erfassung des Endruckverlustes Δp_E nach Stabilisierung dieses Wertes (Punkt 6 Bild, Veränderung Differenzdruck $\leq 1 \text{ Pa}/40 \text{ s}$)
- Auslösen eines Druckluftstoßes (on-line) – führt zu erheblicher Reduzierung des Restdruckverlust (Punkt 7 Bild)
- Ablesen des Restdruckverlustes $\Delta p_{R,on}$ nach Stabilisierung der Messwerte (Veränderung Differenzdruck $\leq 1 \text{ Pa}/40 \text{ s}$) – Punkt 8 Bild
- Abschaltung Reingasvolumenstrom
- Berechnung der zirkulierenden Staubanteile entsprechend Formel (27)



Anhang 4: Ausstattungsmerkmale Filterprüfstand

Komponente	Hersteller/Typ	Parameter
Bürstendispersierer	BEG 1000 Typ B Fa. Palas	Dosierleistung 0,1 – 6,0 kg/h bei Partikelgrößen ca. 1 – 200 µm
Massestromregler	GFC 371 Fa. Aalborg GFC 571 Fa. Aalborg	0,4 – 20 NI/h (Reingaskanal) 4 – 200 NI/h (Rohgaskanal) Genauigkeit 1 % vom Messbereichsendwert
Vakuumpumpen	VT 4.16 Fa. Becker	2 x trockenlaufende Drehschieberpumpe 16 m³/h für Roh- und Reingaskanal, max. Unterdruck 150 mbar absolut
Differenzdruckmessung	HE 5409 Fa. Hesch	Messbereich 0 – 10000 Pa, Genauigkeit 1 % vom Messbereichsendwert
Filtermitteleinspannung	Eigenbau	Spaltgeometrie, Höhe 120 mm, Breite 2 – 20 mm
Absolutfilter	Eigenbau mit Planfilter	Papierfilter Durchmesser 40 mm, Abscheidegrad Prüfaerosol 0,3 µm > 99,5 %
Regenerierung Filtermittel und Rohgasfilter	Mikropul IMV Pro Spülgasspeicher mit integriertem Membranventil	max. 8 bar, Ventilöffnungszeiten ≥ 50 ms (elektronisch)
Rohgasfilter	Fa. R&B Filter	Filterpatrone Staubklasse M, 115 x 202 mm (Durchmesser x Länge)
Schutzfilter	Fa. R&B Filter	Filterpatrone Staubklasse M, 150 x 602 mm (Durchmesser x Länge)
Rahmenkonstruktion	Minitec	Aluminiumprofilsystem

Anhang 5a: Datenblatt Nadelfilzfiltermedium

Otto Pfeffer GmbH & Co.KG
Filterfabrik**Technisches Datenblatt**

Artikel:	PE550 k
Faserauflage	Polyester
Stützgewebe	Polyester
Gewicht:	ca. 550 g/m ² (DIN EN 29073-part 1)
Dicke:	2,1 mm (DIN EN 9073-part 2)
Dichte:	0,26 g/cm ³
Luftdurchlass:	ca. 150 l / min / dm ² / 20 mm WS (DIN 53887)
Höchstzugkraft:	längs > 130 daN/5 cm (DIN EN 29073-part 3) quer > 130 daN/5 cm
Dehnung	längs < 25 % quer < 25 %
Temperaturbeständigkeit:	
Dauertemp.:	150° C
Spitzentemp.:	160° C
Ausrüstung:	Thermofixiert, gesengt + geglättet

Die vorstehenden technischen Daten sind Anhaltspunkte. Änderungen und übliche Toleranzen behalten wir uns vor. Alle Angaben entsprechen bestem Wissen.

Anhang 5b: Datenblatt Membranfiltermedium

Otto Pfeffer GmbH & Co.KG
Filterfabrik**Technisches Datenblatt**

Artikel:	PE540 PTFE-E-Membrane (Type: Extreme)		
Faserauflage	Polyester mit laminiertem ePTFE-Membran anströmseitig		
Stützgewebe	Polyester		
Gewicht:	ca. 540 g/m² (DIN EN 29073-part 1)		
Dicke:	2,0 mm	(DIN EN 9073-part 2)	
BIA Klasse:	M	(Staubklasse M)	
Luftdurchlass:	50-80 l / min / dm² / 20 mm WS (DIN 53887)		
Höchstzugkraft:	längs > 150 daN/5 cm (DIN EN 29073-part 3) quer > 100 daN/5 cm		
Dehnung	längs < 15 % quer < 30 %		
Temperaturbeständigkeit:			
Dauertemp.:	150° C		
Spitzentemp.:	160° C		
Ausrüstung:	Thermofixiert, gesengt + geglättet		

Die vorstehenden technischen Daten sind Anhaltspunkte. Änderungen und übliche Toleranzen behalten wir uns vor. Alle Angaben entsprechen bestem Wissen.

Anhang 6a: Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung von ZSA_A

Calcit MX20 Nadelfilz (variable Anfiltration)

FFB [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Messung 4			Messung 5			Ergebnisse					Statistik			
	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$ZSA_{A,1}$ [%]	$ZSA_{A,2}$ [%]	$ZSA_{A,3}$ [%]	$ZSA_{A,4}$ [%]	$ZSA_{A,5}$ [%]	Mittelwert	STABW.N	Standardfehler	Konfidenzintervall
45	10	1005	14	10	978	12	9	978	12							0,4	0,2	0,3			0,3	0,1	0,1	0,2
90	18	1046	28	18	1036	27	18	1036	27							1,0	0,9	0,9			0,9	0	0	0,1
180	37	1022	75	37	1006	75										3,9	3,9				3,9	0	0	0,4

Apyral 16 Nadelfilz (variable Anfiltration)

FFB [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Messung 4			Messung 5			Ergebnisse					Statistik			
	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$ZSA_{A,1}$ [%]	$ZSA_{A,2}$ [%]	$ZSA_{A,3}$ [%]	$ZSA_{A,4}$ [%]	$ZSA_{A,5}$ [%]	Mittelwert	STABW.N	Standardfehler	Konfidenzintervall
45	10	978	58	9	1002	71	9	1045	84	10	1003	83	9	922	91	5,0	6,2	7,2	7,4	9,0	7,0	1,3	0,7	1,8
135	33	1089	134	33	995	131	34	1025	149	33	967	145				9,6	10,2	11,6	12,0		10,8	1	0,6	1,8
180	36	1032	136	37	978	137	37	971	171							10,0	10,6	14,3			11,7	1,9	1,3	5,8

Anhang 6a: Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung von ZSA_A (Fortsetzung)

Calcit MX20 Membran (variable Anfiltration)

FFB [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Messung 4			Messung 5			Ergebnisse					Statistik			
	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$ZSA_{A,1}$ [%]	$ZSA_{A,2}$ [%]	$ZSA_{A,3}$ [%]	$ZSA_{A,4}$ [%]	$ZSA_{A,2}$ [%]	Mittelwert	STABW.N	Standardfehler	Konfidenzintervall
45	155	1042	159	146	1037	150	152	997	154	157	1064	158				0,5	0,4	0,2	0,1		0,3	0,1	0,1	0,3
90	253	1020	258	245	1030	247	247	1001	251							0,7	0,3	0,5			0,5	0,2	0,1	0,5
180	420	1007	424	421	1038	427	427	1012	433	432	1023	438				0,7	1,0	1,0	1,0		0,9	0,1	0,1	0,3

Apyral 16 Membran (variable Anfiltration)

FFB [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Messung 4			Messung 5			Ergebnisse					Statistik			
	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$ZSA_{A,1}$ [%]	$ZSA_{A,2}$ [%]	$ZSA_{A,3}$ [%]	$ZSA_{A,4}$ [%]	$ZSA_{A,2}$ [%]	Mittelwert	STABW.N	Standardfehler	Konfidenzintervall
45	142	1051	144	145	1045	149	148	980	155							0,2	0,4	0,8			0,5	0,3	0,2	0,8
90	251	1020	253	253	1035	265	258	994	270							0,3	1,5	1,6			1,1	0,6	0,4	1,9
135	321	1005	328	327	995	335	330	978	338	325	978	336	325	978	338	1,0	1,2	1,2	1,7	2,0	1,4	0,4	0,2	0,5
180	423	1004	435	427	1023	439	419	993	432	418	978	432				2,1	2,0	2,3	2,5		2,2	0,2	0,1	0,4

Anhang 6b: Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung von ZSA_{ges}

Calcit MX20 Nadelfilz

FFB [$m^3/(m^2 \cdot h)$]	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ergebnisse			Statistik			
	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$ZSA_{ges,1}$ [%]	$ZSA_{ges,2}$ [%]	$ZSA_{ges,3}$ [%]	Mittelwert	STABW.N	Standardfehler	Konfidenzintervall
45	10	638	53	11	650	50				6,8	6,1		6,5	0,371924	0,3719	4,72574
90	19	1250	108	19	1340	87				7,2	5,1		6,2	1,041139	1,0411	13,2289

Apyral 16 Nadelfilz

FFB [$m^3/(m^2 \cdot h)$]	Messung 1			Messung 2			Messung 3			Ergebnisse			Statistik			
	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$\Delta p_{R,0}$ [Pa]	Δp_E [Pa]	$\Delta p_{R,on}$ [Pa]	$ZSA_{ges,1}$ [%]	$ZSA_{ges,2}$ [%]	$ZSA_{ges,3}$ [%]	Mittelwert	STABW.N	Standardfehler	Konfidenzintervall
45	9	605	69	10	615	77	10	612	86	10,1	11,1	12,6	11,3	1,051896	1,0519	13,3656
90	19	1270	237	18	1271	241				17,4	17,8		17,6	0,185614	0,1856	2,35845

Anhang 7: Ausstattungsmerkmale Technikums-Schlauchfilter

Komponente	Hersteller/Typ	Parameter
Bürstendispergierer	BEG 1000 Typ B Fa. Palas	Dosierleistung 0,1 – 6,0 kg/h bei Partikelgrößen ca. 1 – 200 µm
Rohgasstaub-Konzentrationsmessung	Dusthunter T50 Fa. sick	ca. 0 – 10 g/m³, Messprinzip Transmission, Einbausituation 4,7 x D (Einlauf) und 2,4 x D (Auslauf)
Volumenstromregler	VRA-E Fa. schako	70 – 836 m³/h (Reingaskanal) Einbausituation 2,6 x D (Einlauf) und 2,1 x D (Auslauf), Genauigkeit 5 % ($\geq 2 \times D$)
Radialventilator	RE-31-500-D/2/2,2/RD 0/3190 Fa. Berliner Luft	Volumenstrom bis zu 1407 Nm³/h Antriebsleistung 2,2 kW
Differenzdruckmessung	HE 5409 Fa. Hesch	Messbereich 0 – 10000 Pa, Genauigkeit 1 % vom Messbereichsendwert
Filtermittel	variabel	1–4 Filterelemente (Filterschläuche oder Filterpatronen) je nach Kopfplatte einsetzbar, Länge maximal 1 m
Aerosolspektrometer (optional)	LAP 322 i. V. m. DIL 550 (Verdünnung) und SYS 520 (Umschalteneinheit zwischen zwei Messstellen) Fa. Topas	quasi-simultane Messung der Partikelgrößenverteilung auf Roh- und Reingasseite, Messung unverdünnt oder mit Verdünnungsfaktor 1:100, automatische Umschalteneinheit für Probenahme
Reingasstaub-konzentrationsmessung	TM-F Fa. hund	0 – 2 (20) mg/m³, Messprinzip Lichtstreuung vorwärts, Einbausituation 3,4 x D (Einlauf) und 2,5 x D (Auslauf)
Sicherheitsfilter	Hi-flo X9 Fa. camfil	Taschenfilter mit Gehäuse
Filtermittelregenerierung	1''-Eckventile Fa. Norgren-buschjost	0,4 – 8 bar 1 x Eckventil je Reihe (2 Schläuche) Volumen Windkessel 13,69 l

Anhang 8: Zusammensetzung der Druckverluste des Staubkuchens

Kennwerte Dynamik (Annahme):

ZSA_A : 7,6 %

ZSA_B : 3,7 %

L_{FE} : 3 m

$L_{ZSA,y}$: 1 m

N_{ZSA} : 3

N_W : 8

Berechnung:

Parameter	Apyral 16			Calcit MX20		
ZSA_A	7,6 %			0,3 %		
ZSA_B	3,7 %			5,9 %		
Regenerierung	Δp [%]	ZSA_A [%]	ZSA_B [%]	Δp [%]	ZSA_A [%]	ZSA_B [%]
0	100,0000	0,0000	0,0000	100,0000	0,0000	0,0000
1	82,5333	7,6000	9,8667	83,9667	0,3000	15,7333
2	82,5178	7,6058	9,8764	81,4904	0,3009	18,2087
3	82,5178	7,6058	9,8764	81,1010	0,3010	18,6000

Anhang 9: Checkliste zu zirkulierenden Staubanteilen

Frage: Ist der Betrieb des auszulegenden Oberflächenfilters aus Sicht zirkulierender Staubanteile sinnvoll?

Vorgehen:

- 1 Sammlung von Informationen bezüglich des auszulegenden Oberflächenfilters entsprechend der n. g. Einflüsse
- 2 objektiver / subjektiver Vergleich mit einer Best-Practice-Referenzanwendung (Performance +/- 0) durch Ankreuzen der jeweiligen Performance-Werte
- 3 Addition der Performance-Werte und Beurteilung der Auslegungskriterien

Einfluss		Wirkung negativ → positiv		Performance							Wert
				negativ		+/-	positiv				
Rohgasstaubkonzentration	höher	→	geringer			-1	0	+1			
Strömungsführung	diffus	→	top-down		-2	-1	0	+1	+2		
Filterflächenbelastung	höher	→	geringer	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	
Staubeigenschaften	frei fließend	→	gut agglom.	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	
Filtermittelregenerierung	on-line	→	off-line	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	
Gassenabstand	geringer	→	höher	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	
Filtermittel	rauh	→	Membran		-2	-1	0	+1	+2		
Sonstiges*											
Summe											

* Sonstige Einflüsse können auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse, Erfahrungswerten oder detaillierterer Betrachtung einzelner Einflüsse individuell ergänzt werden

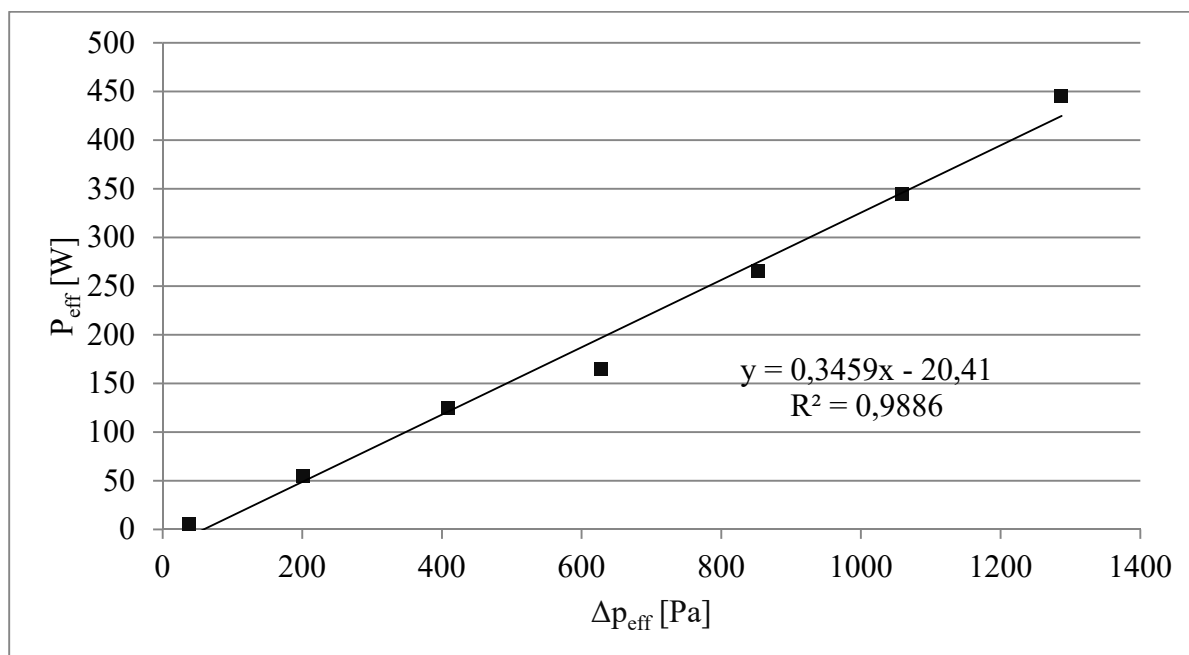
Beurteilung Performance-Wert:

- ≤ -2 Auslegung nicht empfehlenswert
 $-2 < x \leq 1$ Auslegung i.O.
 ≥ 2 Auslegung mit voraussichtlichen Vorteilen gegenüber Referenzanwendung

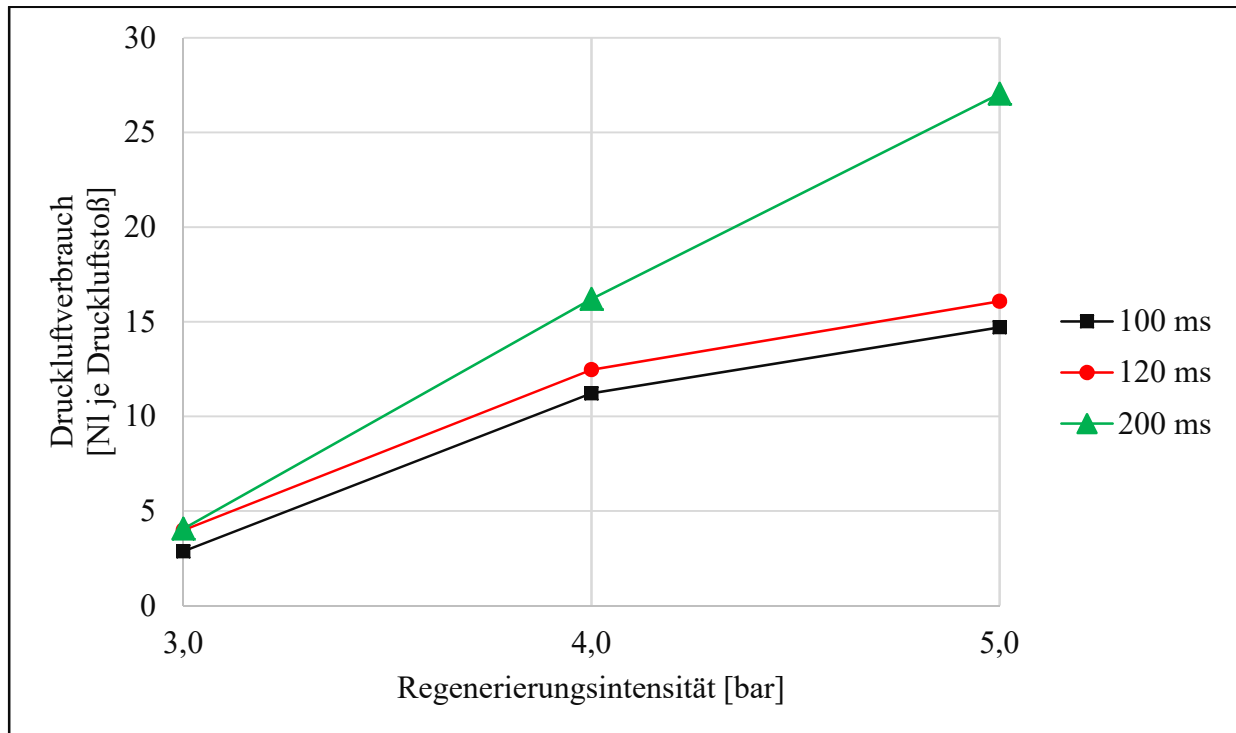
Anhang 10: Ausstattungsmerkmale Rotationsentstauber

Komponente	Hersteller/Typ	Parameter
Bürstendispergierer	BEG 1000 Typ B Fa. Palas	Dosierleistung 0,1 – 6,0 kg/h bei Partikelgrößen ca. 1 – 200 µm
Rohgasstaub-konzentrationsmessung	Dusthunter T50 Fa. sick	0 – 10 (20) g/m ³ , Messprinzip Transmission, Einbausituation 4,5 x D (Einlauf) und 2,5 x D (Auslauf)
Trommelrotation	Eigenbau auf Basis Schwenktrieb Fa. IMO	ca. 1 – 10 min ⁻¹ (Getriebemotor mit Frequenzumrichter, ggfs. Fremdkühlung)
Volumenstromregler	VRA-E Fa. schako	70 – 836 m ³ /h (Reingaskanal) Einbausituation 2,5 x D (Einlauf) und 1,9 x D (Auslauf), Genauigkeit 5 % (≥ 2 x D)
Radialventilator	RE-32-315-D/2/0,75/RD 0/2855 Fa. Berliner Luft	469 Nm ³ /h Luftleistung 0,75 kW Antriebsleistung
Differenzdruckmessung	HE 5409 Fa. Hesch	Messbereich 0 – 10000 Pa, Genauigkeit 1 % vom Messbereichsendwert
Filtermittel	variabel	1 Filtertrommel (Durchmesser 318 mm, Länge 1000 mm) mit Brutto-Mantelfläche ca. 1,00 m ²
Aerosolspektrometer (optional)	LAP 322 i. V. m. DIL 550 (Verdünnung) und SYS 520 (Umschalt-einheit zwischen zwei Messstellen) (Fa. Topas)	quasi-simultane Messung der Partikelgrößenverteilung auf Roh- und Reingasseite, Messung unverdünnt oder mit Verdünnungsfaktor 1:100, automatische Umschalt-einheit für Probenahme
Reingasstaub-konzentrationsmessung	TM-F Fa. hund	0 – 2 (20) mg/m ³ , Messprinzip Lichtstreuung vorwärts, Einbausituation 3,4 x D (Einlauf) und 2,5 x D (Auslauf)
Sicherheitsfilter	Hi-flo X9 Fa. camfil	Taschenfilter mit Gehäuse
Filtermittelregenerierung	1''-IMV PRO Fa. MikroPul	2 – 8 bar Ventil-in-Tank-Anwendung, Volumen 2,2 l

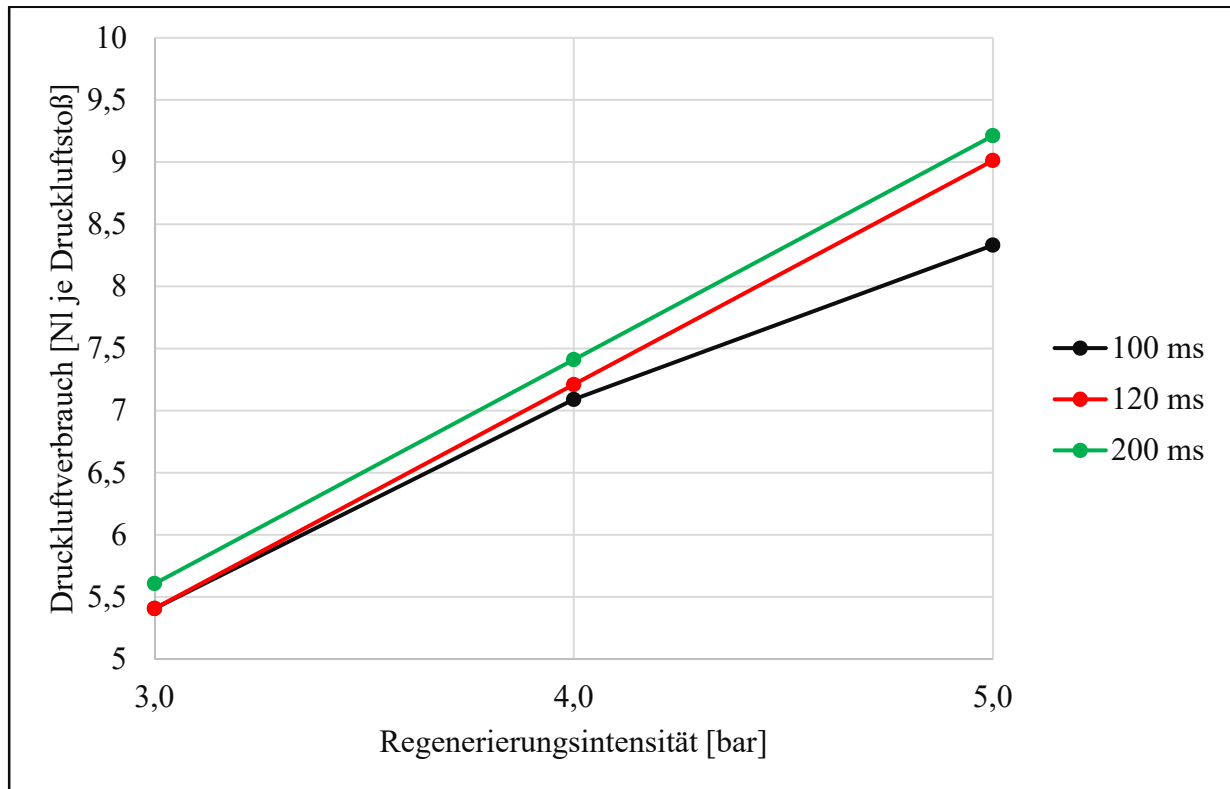
Anhang 11: Effektive Leistungsaufnahme des Schlauchfilters



Anhang 12a: Druckluftverbrauch Schlauchfilter

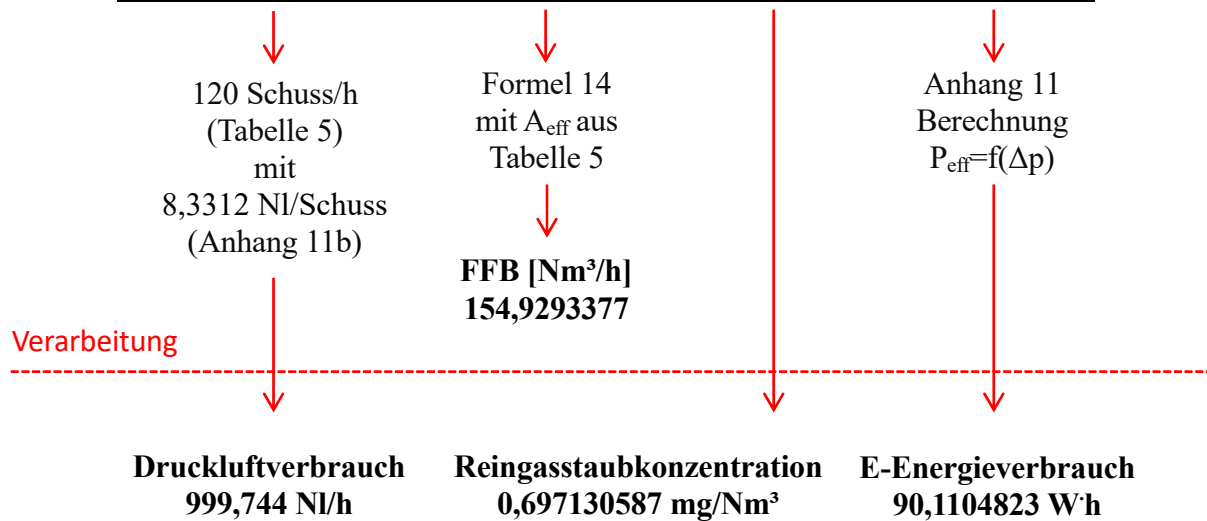


Anhang 12b: Druckluftverbrauch Rotationsentstauber



Anhang 13: Auswertung Benchmark

Zeitstempel	\dot{V}_{rein} [Nm³/h]	c_{rein} [mg/Nm³]	Δp
...
2016-09-05 14:19:17	107,9390643	0,879961515	322,15
2016-09-05 14:19:18	108,8238107	0,660778451	331,15
2016-09-05 14:19:19	107,9390643	0,480775779	326,15
2016-09-05 14:19:20	107,0543179	0,372547044	338,15
2016-09-05 14:19:21	107,9390643	0,288962207	327,15
...
Mittelwert	108,9463103	0,697130587	319,5157048



Leistungskennzahlen

Anhang 14: Berechnung Fraktionsabscheidegrad

Messungen Schlauchfilter								N	2	t(crit) für 95%-Konfidenzintervall			12,70620474
Nr.	x _M [μm]	x _O [μm]	N _p Messung Rohgas A	N _p Messung Rohgas B	Mittelwert N _p Zyklus Rohgas	N _p Zyklus Reingas A	N _p Zyklus Reingas B	T(x) A	T(x) B	Mittelwert	STABW.N	Standardfehler	Konfidenz- intervall
1	0,21	0,22	1146	1018	2360727,273	8598	7972	0,996376022	0,996625886	0,996500954	0,000124932	0,000124932	0,001587414
2	0,23	0,24	1598	1670	3565090,909	6408	6614	0,998211513	0,998146333	0,998178923	3,25901E-05	3,25901E-05	0,000414097
3	0,255	0,27	2792	2632	5917090,909	6484	6550	0,998909643	0,998893959	0,998901801	7,84211E-06	7,84211E-06	9,96434E-05
4	0,285	0,3	2906	3016	6460363,636	5008	5328	0,999228668	0,999175965	0,999202317	2,63514E-05	2,63514E-05	0,000334826
5	0,325	0,35	1854	1742	3922909,091	2444	2772	0,999380092	0,99929397	0,999337031	4,30613E-05	4,30613E-05	0,000547146
6	0,375	0,4	1822	1710	3853090,909	2272	2646	0,999413277	0,99931385	0,999363564	4,97134E-05	4,97134E-05	0,000631668
7	0,45	0,5	1992	1928	4276363,636	2122	2418	0,999506253	0,999435037	0,999470645	3,56078E-05	3,56078E-05	0,00045244
8	0,55	0,6	3118	2846	6506181,818	2802	3094	0,999571475	0,999524848	0,999548162	2,33135E-05	2,33135E-05	0,000296226
9	0,65	0,7	3668	3670	8005090,909	2458	2686	0,999694473	0,999664743	0,999679608	1,48651E-05	1,48651E-05	0,000188879
10	0,75	0,8	1462	1310	3024000	679	624	0,99977658	0,999793823	0,999785201	8,62127E-06	8,62127E-06	0,000109544
11	0,85	0,9	1035	1082	2309454,545	429	388	0,999815166	0,999832135	0,99982365	8,48441E-06	8,48441E-06	0,000107805
12	0,95	1	1036	943	2158909,091	323	271	0,999851132	0,999874578	0,999862855	1,17232E-05	1,17232E-05	0,000148957
13	1,1	1,2	1058	902	2138181,818	287	244	0,999866442	0,999885979	0,99987621	9,76888E-06	9,76888E-06	0,000124125

Anhang 14: Berechnung Fraktionsabscheidegrad (Fortsetzung)

Messungen Rotationsentstauber								N	2	t(crit) für 95%-Konfidenzintervall			12,70620474
Nr.	x _M [µm]	x _O [µm]	N _P Messung Rohgas A	N _P Messung Rohgas B	Mittelwert N _P Zyklus Rohgas	N _P Zyklus Reingas A	N _P Zyklus Reingas B	T(x) A	T(x) B	Mittelwert	STABW.N	Standardfehler	Konfidenz- intervall
1	0,21	0,22	1146	1018	2360727,273	10680	8062	0,964047447	0,972860535	0,968453991	0,004406544	0,004406544	0,055990452
2	0,23	0,24	1598	1670	3565090,909	7626	8220	0,983000721	0,981676623	0,982338672	0,000662049	0,000662049	0,00841213
3	0,255	0,27	2792	2632	5917090,909	10330	9844	0,98612617	0,986778898	0,986452534	0,000326364	0,000326364	0,004146849
4	0,285	0,3	2906	3016	6460363,636	10340	8302	0,987280563	0,989787547	0,988534055	0,001253492	0,001253492	0,015927124
5	0,325	0,35	1854	1742	3922909,091	6002	4352	0,987841163	0,991183729	0,989512446	0,001671283	0,001671283	0,021235664
6	0,375	0,4	1822	1710	3853090,909	6088	4068	0,987443469	0,991609729	0,989526599	0,00208313	0,00208313	0,026468679
7	0,45	0,5	1992	1928	4276363,636	6182	4050	0,988511623	0,992473645	0,990492634	0,001981011	0,001981011	0,025171131
8	0,55	0,6	3118	2846	6506181,818	8814	4800	0,98923408	0,994137007	0,991685544	0,002451464	0,002451464	0,0311488
9	0,65	0,7	3668	3670	8005090,909	11100	4828	0,988980522	0,995207024	0,992093773	0,003113251	0,003113251	0,0395576
10	0,75	0,8	1462	1310	3024000	4701	1561	0,987645853	0,995897719	0,991771786	0,004125933	0,004125933	0,052424949
11	0,85	0,9	1035	1082	2309454,545	2938	793	0,989890104	0,997271223	0,993580664	0,003690559	0,003690559	0,046893001
12	0,95	1	1036	943	2158909,091	2701	677	0,990057525	0,997507939	0,993782732	0,003725207	0,003725207	0,047333248
13	1,1	1,2	1058	902	2138181,818	2672	554	0,990068928	0,997940938	0,994004933	0,003936005	0,003936005	0,050011684

Anhang 15a: Lebenszykluskosten Rotationsentstauber

Jahr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Geldfluss [€]																						
Investition	213.331																					
Instandhaltung		20.170	20.513	20.862	21.217	21.577	21.944	22.317	22.696	23.082	23.475	23.874	24.280	24.692	25.112	25.539	25.973	26.415	26.864	27.320	27.785	
Filtermittel		4.233	4.305	4.378	4.453	4.528	4.605	4.684	4.763	4.844	4.927	5.010	5.096	5.182	5.270	5.360	5.451	5.544	5.638	5.734	5.831	
Stromkosten		86.728	88.202	89.702	91.227	92.777	94.355	95.959	97.590	99.249	100.936	102.652	104.397	106.172	107.977	109.813	111.679	113.578	115.509	117.472	119.469	
Druckluftkosten		93.007	94.588	96.196	97.831	99.494	101.186	102.906	104.655	106.435	108.244	110.084	111.956	113.859	115.794	117.763	119.765	121.801	123.871	125.977	128.119	
Kapitalwert [€]																						
Abzinsungsfaktor	1,0000	0,9901	0,9803	0,9706	0,9610	0,9515	0,9420	0,9327	0,9235	0,9143	0,9053	0,8963	0,8874	0,8787	0,8700	0,8613	0,8528	0,8444	0,8360	0,8277	0,8195	Summe
Investition	213.331																				213.331	
Instandhaltung		19.971	20.109	20.248	20.389	20.530	20.672	20.816	20.960	21.105	21.251	21.399	21.547	21.696	21.847	21.998	22.150	22.304	22.459	22.614	22.771	426.835
Filtermittel		4.191	4.220	4.250	4.279	4.309	4.339	4.369	4.399	4.429	4.460	4.491	4.522	4.553	4.585	4.617	4.649	4.681	4.713	4.746	4.779	89.581
Stromkosten		85.869	86.464	87.064	87.667	88.275	88.886	89.502	90.123	90.747	91.376	92.010	92.647	93.289	93.936	94.587	95.243	95.903	96.567	97.237	97.911	1.835.303
Druckluftkosten		92.086	92.724	93.367	94.014	94.666	95.322	95.982	96.648	97.317	97.992	98.671	99.355	100.043	100.737	101.435	102.138	102.846	103.559	104.276	104.999	1.968.177
Lebenszykluskosten [€]																						4.545.519

Anhang 15b: Lebenszykluskosten Schlauchfilter

Jahr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Geldfluss [€]																						
Investition	79.746																					
Instandhaltung		3.547	3.607	3.668	3.731	3.794	3.858	3.924	3.991	4.059	4.128	4.198	4.269	4.342	4.416	4.491	4.567	4.645	4.724	4.804	4.885	
Filtermittel		1.450	1.475	1.500	1.525	1.551	1.578	1.605	1.632	1.660	1.688	1.717	1.746	1.775	1.806	1.836	1.867	1.899	1.932	1.964	1.998	
Stromkosten		90.750	92.293	93.862	95.457	97.080	98.730	100.409	102.116	103.852	105.617	107.413	109.239	111.096	112.984	114.905	116.858	118.845	120.865	122.920	125.010	
Druckluftkosten		19.503	19.835	20.172	20.515	20.864	21.218	21.579	21.946	22.319	22.698	23.084	23.477	23.876	24.282	24.694	25.114	25.541	25.975	26.417	26.866	
Kapitalwert [€]																						
Abzinsungsfaktor	1,0000	0,9901	0,9803	0,9706	0,9610	0,9515	0,9420	0,9327	0,9235	0,9143	0,9053	0,8963	0,8874	0,8787	0,8700	0,8613	0,8528	0,8444	0,8360	0,8277	0,8195	Summe
Investition	79.746																				79.746	
Instandhaltung		3.511	3.536	3.560	3.585	3.610	3.635	3.660	3.685	3.711	3.737	3.763	3.789	3.815	3.841	3.868	3.895	3.922	3.949	3.976	4.004	75.051
Filtermittel		1.436	1.446	1.456	1.466	1.476	1.486	1.497	1.507	1.517	1.528	1.539	1.549	1.560	1.571	1.582	1.593	1.604	1.615	1.626	1.637	30.689
Stromkosten		89.851	90.474	91.101	91.732	92.368	93.008	93.653	94.302	94.956	95.614	96.276	96.944	97.616	98.292	98.973	99.659	100.350	101.046	101.746	102.451	1.920.414
Druckluftkosten		19.310	19.444	19.579	19.714	19.851	19.989	20.127	20.267	20.407	20.549	20.691	20.834	20.979	21.124	21.271	21.418	21.566	21.716	21.866	22.018	412.720
Lebenszykluskosten [€]																					2.526.816	